



Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i  
Aeroespacial de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# TRABAJO FINAL DE GRADO

**TÍTULO DEL TFG:** Estudio sobre la viabilidad de explotaciones mineras en cuerpos extraterrestres

**TITULACIÓN:** Grado en Ingeniería de Sistemas Aeroespaciales, mención en Aeronavegación

**AUTOR:** Francesc Torrens Garcia

**DIRECTOR:** Pere Bruna Escuer

**DATA:** 15 de julio del 2019



**Título:** Estudio sobre la viabilidad de explotaciones mineras en cuerpos extraterrestres

**Autor:** Francesc Torrens Garcia

**Director:** Pere Bruna Escuer

**Data:** 15 de Julio del 2019

## Resumen

El planeta Tierra ofrece grandes cantidades de recursos naturales necesarios para abastecer a la sociedad y a la industria de hoy en día. Algunos de estos recursos se transforman para fabricar materiales imprescindibles para la industria aeroespacial. En tan solo 100 años, dichos recursos han sido extraídos y explotados de forma masiva. El enorme impacto medioambiental y social que esto conlleva, junto con la problemática derivada de la escasez de los recursos en un futuro no muy lejano, sugiere empezar a buscar soluciones. Así pues, los avances en el ámbito de la exploración espacial están abriendo las puertas hacia la búsqueda de estos recursos en otros cuerpos del sistema solar.

En el presente trabajo se desarrolla una investigación sobre la viabilidad de explotar, en cuerpos extraterrestres, recursos necesarios para la industria aeroespacial. Para ello, es necesario previamente conocer los materiales más utilizados en esta industria, así como estudiar y analizar la explotación de sus recursos en nuestro planeta. De esta manera se puede comprobar el impacto que se genera y su disponibilidad actual. Por último, se estudian distintos cuerpos del espacio en busca de dichos materiales, así como la posibilidad para explotar sus recursos. Con este objetivo se puede promover la concienciación sobre la problemática ambiental y social del planeta, así como aumentar el interés hacia la ciencia y tecnología espacial.

**Palabras clave:** Ciencia de materiales, sostenibilidad, escasez, recursos, exploración espacial

**Title:** Feasibility study of mining in extraterrestrial bodies

**Author:** Francesc Torrens Garcia

**Director:** Pere Bruna Escuer

**Date:** July, 15th 2019

## Overview

Planet Earth provides large amounts of natural resources required to supply the society and industry of today. Some of these resources are transformed to produce needed materials in the aerospace industry. In only 100 years, these resources have been extracted and exploited in a massive way. The environmental and social impact which is generated, as well as some problems related with the possible scarcity in a short-term future, suggest to start looking for solutions. In this way, the progress in the space exploration area is enabling to open new doors to the research of these resources in other solar system's bodies.

The present study has developed a research about the feasibility of exploiting in extraterrestrial bodies, the resources needed to supply the aerospace industry. For this reason, it is necessary to previously know the most used materials in this industry, as well as to study and analyse the exploitation of its resources in our planet. In this way, it is possible to verify the impact generated and its current availability. Finally, some different space bodies have been researched in order to look for those materials, together with the possibility to exploit the resources. Following this objective, it is possible to promote the concern about the environmental and social problems, and increase the interest related with the space science and technology.

**Key words:** Science of materials, sustainability, scarcity, resources, space exploration

# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1. Los materiales del sector aeroespacial .....</b>	<b>2</b>
1.1. Evolución de los materiales en la industria aeroespacial.....	2
1.2. Propiedades y aplicaciones de los materiales .....	6
1.2.1. Aluminio .....	6
1.2.2. Titanio .....	8
1.2.3. Materiales compuestos.....	9
<b>CAPÍTULO 2. Explotación de los recursos naturales en la Tierra .....</b>	<b>11</b>
2.1. Aluminio .....	12
2.1.1. Bauxita.....	12
2.1.2. Proceso de extracción del mineral .....	12
2.1.3. Proceso de obtención del aluminio .....	13
2.1.4. Reciclaje .....	14
2.2. Titanio .....	16
2.2.1. Ilmenita y rutilo.....	16
2.2.2. Proceso de extracción de los minerales.....	16
2.2.3. Proceso de obtención del titanio .....	17
2.2.4. Reciclaje .....	18
2.3. Materiales compuestos de matriz orgánica .....	19
2.3.1. Petróleo .....	19
2.3.2. Proceso de extracción del petróleo .....	20
2.3.3. Proceso de obtención de los RP .....	21
2.3.4. Reciclaje .....	22
<b>CAPÍTULO 3. Impacto de la explotación de recursos naturales .....</b>	<b>24</b>
3.1. Impacto medioambiental .....	25
3.2. Impacto social.....	28
<b>CAPÍTULO 4. Disponibilidad de los materiales en la Tierra .....</b>	<b>30</b>
4.1. Recursos y reservas naturales .....	30
4.2. Métodos teóricos .....	31
4.3. Disponibilidad de los materiales.....	33
4.3.1. Aluminio .....	33
4.3.2. Titanio .....	36
4.3.3. Materiales compuestos de matriz orgánica (plástico) .....	38
4.4. Resumen y conclusiones .....	40

<b>CAPÍTULO 5. Explotación de los recursos en el espacio.....</b>	<b>42</b>
<b>5.1. Cuerpos extraterrestres .....</b>	<b>42</b>
5.1.1. Satélites .....	42
5.1.2. Asteroides .....	48
5.1.3. Planetas.....	51
<b>5.2. Resumen y conclusiones .....</b>	<b>54</b>
 <b>CONCLUSIONES .....</b>	 <b>57</b>
 <b>Bibliografía.....</b>	 <b>59</b>
 <b>ANEXOS .....</b>	 <b>66</b>
Anexo A. Glosario .....	66
Anexo B. Aluminio: Características, aleaciones y aplicaciones .....	68
Anexo C. Titanio: Características, aleaciones y aplicaciones.....	72
Anexo D. Materiales compuestos: Clasificación, características y aplicaciones .....	76
Anexo E. Datos de producción .....	80

## Listado de figuras

Figura 1.1 Modelo <i>Flyer I</i> , hecho de madera y tela por los hermanos Wright ....	3
Figura 1.2 Materiales utilizados en diferentes modelos de Airbus.....	5
Figura 1.3 Materiales utilizados en diferentes modelos de Boeing.....	5
Figura 1.4 Aleaciones del aluminio.....	7
Figura 1.5 Clasificación de los materiales compuestos.....	10
Figura 2.1 Ciclo de vida de los materiales.....	11
Figura 2.2 Extracción de bauxita en una mina a cielo abierto .....	13
Figura 2.3 Proceso de obtención del Al.....	14
Figura 2.4 Ciclo de vida del aluminio.....	15
Figura 2.5 Sistema de draga y planta de tratamiento flotante .....	17
Figura 2.6 Sistema de bombeo de petróleo .....	20
Figura 2.7 Proceso de producción de los polímeros .....	21
Figura 2.8 Métodos de fabricación de materiales compuestos poliméricos .....	22
Figura 3.1 Flujo de entradas y salidas del ciclo de vida de un material.....	25
Figura 3.2 Ejemplos de impactos medioambientales en minas: a) destrucción del terreno, b) voladuras fuera de límites, c) contaminación por polvo .....	26
Figura 3.3 Impacto medioambiental en la producción de Al.....	26
Figura 3.4 Impacto social de la actividad minera.....	29
Figura 3.5 Estándares de una mina sostenible .....	29
Figura 4.1 Clasificación de los recursos naturales .....	31
Figura 4.2 Graficas de producción definidas por diferentes métodos: a) método del R/P, b) método de Hubbert.....	32
Figura 4.3 Factores que afectan a la curva de agotamiento .....	33
Figura 4.4 Producción mundial de aluminio (1900-2018).....	34
Figura 4.5 Producción mundial de bauxita (1900-2018).....	34
Figura 4.6 Pico de Hubbert del aluminio .....	35
Figura 4.7 Producción mundial de titanio esponja (1994-2018) .....	36
Figura 4.8 Producción mundial de los minerales del titanio (1925-2018) .....	37
Figura 4.9 Pico de Hubbert del titanio (ilmenita).....	37
Figura 4.10 Producción mundial de plástico (1950-2017) .....	38
Figura 4.11 Producción mundial de petróleo (1900-2017) .....	39
Figura 4.12 Pico de Hubbert del petróleo: a) basado en reservas demostradas, b) basado en recursos.....	40
Figura 5.1 Ciclo de explotación de los recursos espaciales .....	43

Figura 5.2 Composición química de la Luna (% en peso) .....	44
Figura 5.3 Clasificación de las rocas y minerales de la Luna .....	44
Figura 5.4 Concentración de aluminio y titanio en la Luna .....	45
Figura 5.5 Ilustración de un robot minando la Luna .....	46
Figura 5.6 Recreación de una explotación minera en la Luna .....	47
Figura 5.7 Porcentaje de asteroides accesibles en función de delta-V .....	49
Figura 5.8 Recreación de una explotación in situ de un asteroide pequeño capturado .....	51
Figura 5.9 Composición química del suelo de Marte.....	52
Figura 5.10 Clasificación y abundancia de los minerales en Marte.....	52
Figura 5.11 Concentración de plagioclasa en Marte .....	53
Figura B.1 Estructura de un fuselaje semimonocasco .....	70
Figura B.2 Estructura interna de un ala.....	70
Figura C.1 Materiales de un motor <i>turbofan</i> .....	73
Figura D.1 Materiales compuestos utilizados en un avión .....	77



## Listado de tablas

Tabla 3.1 Evaluación del impacto ambiental del aluminio y el titanio .....	27
Tabla 4.1 Disponibilidad de los materiales y sus recursos en la Tierra .....	40
Tabla 5.1 Recursos espaciales de la Luna, los asteroides y Marte .....	54
Tabla B.1 Características principales del Al .....	68
Tabla B.2 Propiedades del Al .....	68
Tabla B.3 Aplicaciones del Al .....	71
Tabla C.1 Características principales del Ti .....	72
Tabla C.2 Propiedades del Ti .....	72
Tabla C.3 Aplicaciones de las aleaciones alfa y casi alfa del Ti .....	74
Tabla C.4 Aplicaciones de las aleaciones beta del Ti .....	74
Tabla C.5 Aplicaciones de las aleaciones alfa/beta del Ti .....	75
Tabla D.1 Aplicaciones de los materiales compuestos según la matriz .....	78
Tabla D.2 Aplicaciones de los materiales compuestos según el refuerzo .....	79
Tabla E.1 Datos de producción de los materiales y de los recursos naturales .....	82

## Listado de acrónimos

AFRP	<i>Aramid Fiber Reinforced Plastics</i>
AP	<i>Acidification Potential</i>
APU	<i>Auxiliary Power Unit</i>
AU	<i>Astronomical Units</i>
BCC	<i>Body Centered Cubic</i>
CFRP	<i>Carbon Fiber Reinforced Plastics</i>
CMC	<i>Ceramic Matrix Composites</i>
ECS	<i>Environmental Control System</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
GER	<i>Gross Energy Requirement</i>
GFRP	<i>Glass Fiber Reinforced Plastics</i>
GLARE	<i>Glass Reinforced</i>
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
HCP	<i>Hexagonal Close Packet</i>
HPFTP	<i>High-Pressure Fuel Turbopump</i>
ISRU	<i>In Situ Resource Utilization</i>
LWT	<i>Lightweight Tank</i>
MMC	<i>Metal Matrix Composites</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NEA	<i>Near Earth Asteroid</i>
PGM	<i>Platinum Group Metals</i>
PPM	<i>Parts Per Million</i>
RCC	<i>Reinforced Carbon-Carbon</i>
RP	<i>Reinforced Plastics</i>
RPR	<i>Reserves-to-Production Ratio</i>
SLWT	<i>Super Lightweight Tank</i>
SWB	<i>Solid Waste Burden</i>
SWT	<i>Standard Weight Tank</i>
TPS	<i>Thermal Protection System</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
VOC	<i>Volatile Organic Compound</i>

## INTRODUCCIÓN

La sociedad y la industria de hoy en día se abastece de una gran cantidad de recursos naturales que ofrece el planeta Tierra. Estos recursos se extraen y se transforman para obtener tanto la energía como los materiales necesarios para cubrir su creciente demanda. Por ello, en este trabajo se desarrolla una investigación sobre la explotación de los recursos en la Tierra, así como la posibilidad de explotarlos en otros cuerpos del sistema solar.

La industria aeroespacial, uno de los sectores en pleno crecimiento, necesita gran parte de estos recursos. No obstante, su explotación conlleva importantes problemas medioambientales y sociales. Además, puesto que estos recursos son limitados, en un futuro podrían empezar a generarse los primeros problemas relacionados con su escasez. Ante esta problemática, una de las soluciones podría ser la explotación de los recursos en cuerpos extraterrestres.

Debido a la gran cantidad de recursos que ofrece la Tierra, en el presente trabajo se ha dispuesto a estudiar específicamente los materiales más utilizados en la industria aeroespacial. En el primer capítulo se ha analizado la evolución del uso de materiales en este sector para, posteriormente, poder analizar todas las fases de explotación de los recursos y obtención de dichos materiales, esto es, su ciclo de vida. En el tercer capítulo se ha estudiado el impacto generado durante las diferentes etapas de la explotación. En el siguiente capítulo se ha evaluado la disponibilidad de estos materiales y sus recursos en la Tierra. Esto se ha hecho, principalmente, a partir de sus datos de producción, recursos y reservas. Por último, en el capítulo cinco se ha estudiado la viabilidad para explotar dichos recursos en la Luna, los asteroides y Marte.

Los objetivos de este trabajo son, en primer lugar, interrelacionar la problemática ambiental y social existente en la Tierra, así como la escasez de los recursos, con el creciente interés sobre la ciencia y tecnología espacial y, en segundo lugar, estudiar la viabilidad de la explotación de recursos espaciales.

## **CAPÍTULO 1. Los materiales del sector aeroespacial**

Desde los inicios, el sueño de volar ha estado siempre presente en la humanidad. Mediante la observación de las aves y otros animales, el ser humano ha sido capaz de crear máquinas capaces de sustentarse en el aire. Estas máquinas han ido evolucionando a lo largo de los años, hasta el punto de poder llevar al hombre al espacio.

El sector aeroespacial está siempre en continuo desarrollo, desde los primeros intentos de volar hasta la llegada de los dos grandes conflictos bélicos del siglo XX, pasando por la aviación comercial y, finalmente, por la conquista del espacio mediante la exploración espacial.

Los desarrollos en ingeniería aeroespacial se pueden clasificar en diferentes categorías: aerodinámica, motores, ayudas de control, radio y navegación, fuselaje y diseño estructural. Con esto, la ciencia de materiales ha sido un factor clave para el desarrollo de nuevas tecnologías, descubriendo y desarrollando nuevos materiales y métodos de utilización para este y otros sectores.

### **1.1. Evolución de los materiales en la industria aeroespacial**

Los primeros intentos de volar se resumen en artefactos hechos de madera y plumas, globos aerostáticos de tela y papel, planeadores, y los primeros aviones impulsados con motores.

En los comienzos, los inventores construían y diseñaban sus propios prototipos en pequeños talleres. Estos centraban todos sus conocimientos en conseguir una máquina capaz de vencer a la gravedad dejando a un lado la seguridad y los materiales de fabricación de la aeronave, y centrándose en el problema más importante: el peso [1].

Los primeros modelos estaban hechos de madera y tela, los únicos materiales suficientemente ligeros y resistentes capaces de sustentar a las aeronaves con sus pesados motores de pistón (Figura 1.1). Estos materiales eran fáciles de obtener y su coste era muy asequible.

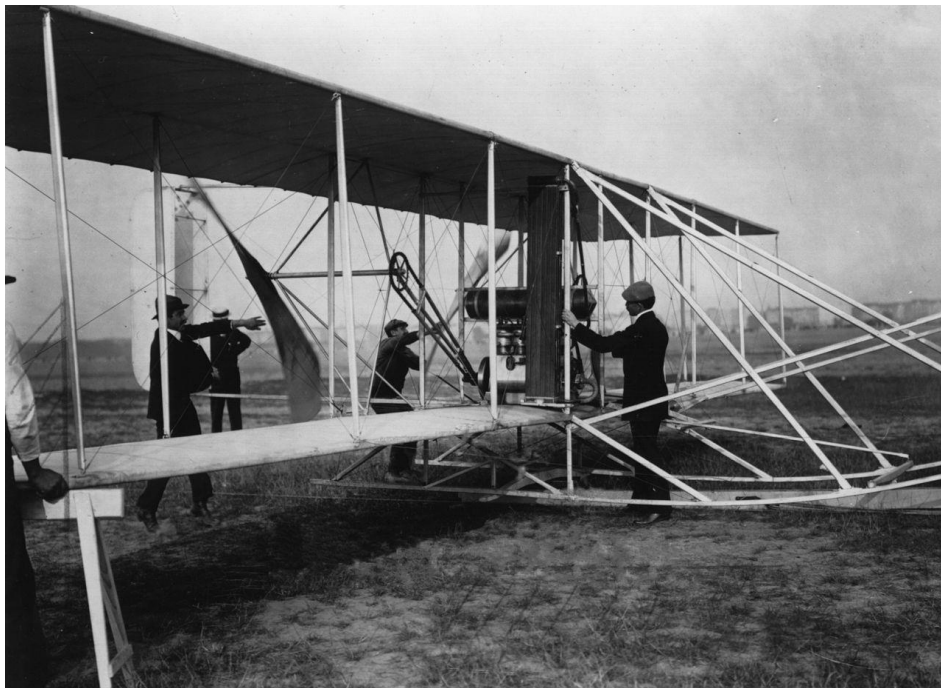
La madera se empleaba en forma de vigas, refuerzos y costillas en la estructura del avión. Aunque su uso parecía adecuado, comportándose en muchos aspectos como un material compuesto debido a su constitución por capas, pronto empezó a presentar diferentes problemas: por un lado, sufría cambios de tamaño y de propiedades debido a las diferentes condiciones atmosféricas y, por otro lado, presentaba problemas de degradación del material por ataques biológicos [2].

En cuanto a la tela, ésta estaba fabricada de fibras orgánicas como el algodón, y sus funciones se centraban en proporcionar el contorno aerodinámico

requerido para sustentar a la aeronave y en proteger la estructura de madera. Además de esto, se usaban cables de acero para el control de los mandos del avión.

Los motores de pistón en los inicios del siglo XX estaban hechos de hierro, por lo que eran muy pesados. Además, se tenían que construir con materiales capaces de soportar altas temperaturas para un buen funcionamiento. Para poder mejorar su rendimiento y su peso, se empezó a utilizar el aluminio en la estructura de esos motores. Así lo hicieron los pioneros de la aviación, los hermanos Wright, utilizando una aleación de aluminio y cobre en los motores de combustión interna de sus aviones *Flyer* [3].

Así pues, el diseño básico de la primera generación de aviones estaba basado en biplanos con alas formadas con costillas y largueros de madera, cables de alambre, fuselajes en forma de caja recubiertos con tela y trenes de aterrizaje fijos. Por esto, las capacidades de vuelo de estos aviones eran muy limitadas.



**Figura 1.1** Modelo *Flyer I*, hecho de madera y tela por los hermanos Wright

En aquella época parecía imposible fabricar aeronaves hechas de metal, principalmente debido a su peso. Sin embargo, esta idea empezó a ganar terreno cuando se mejoró la potencia de los motores, aumentaron las dimensiones y el peso de las aeronaves y se mejoraron sus capacidades de vuelo. Con ello, se empezaron a tener en cuenta la estructura y los materiales de fabricación, enfocando la industria aeronáutica a la fabricación de aeronaves más resistentes, ligeras, rápidas y eficientes para su uso tanto en combate como en transporte. Con esto, los materiales metálicos empezarían poco a poco a sustituir a la madera y a la tela [4].

De esta manera se incorporó el acero, un material que presentaba buena resistencia, aunque era muy denso y tenía problemas de corrosión. Por eso no se utilizó de forma masiva, sino en pequeñas partes de la estructura del avión (en piezas con forma de tubo) o en la superficie de la cola, ya que inicialmente los ingenieros no estaban muy seguros de cómo combinar piezas metálicas con los revestimientos de tela tradicionales.

No obstante, el uso de metales en las estructuras de los aviones no tuvo un gran impacto hasta que no se desarrollaron mejoras en sus aleaciones. Este era el caso del aluminio, el cual no estaba bien considerado debido a sus bajas prestaciones. Pero en los años 30, y con el desarrollo de la metalurgia, se empezaron a implementar aleaciones de aluminio. Estas proporcionaban un material menos pesado que el acero, resistente, económico y fácilmente trabajable y maleable [2].

En la Segunda Guerra Mundial, y con la necesidad de obtener un medio de transporte que pudiera soportar mayores cargas, se comenzó a realizar un estudio más centrado en la estructura de la aeronave. Fue entonces cuando se implementó el aluminio de manera masiva en la fabricación de aeronaves (aproximadamente un 70 % de los componentes de los aviones eran de aluminio). La introducción de este metal en la aviación permitió desarrollar nuevos diseños teniendo en cuenta una mayor carga y un mayor tamaño, además de implementar mejoras en la velocidad y en la maniobrabilidad [5].

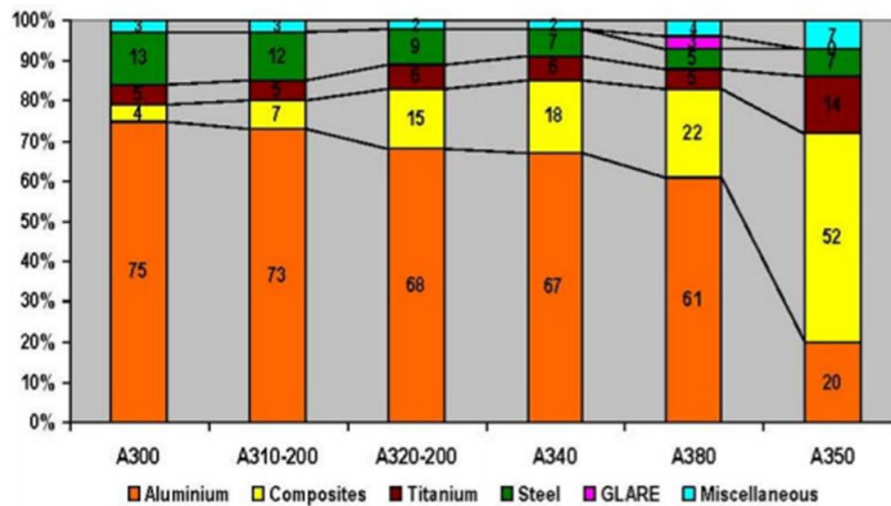
La llegada de los motores reactores en 1947 supuso el comienzo de una nueva era. Esta era estaría marcada por la necesidad de fabricar aviones más rápidos, con mayores cargas estructurales, capacidades de vuelo y mayores prestaciones. Todo esto suponía la demanda de nuevos materiales. El objetivo era interrelacionar el peso, el consumo y el alcance. Buscar la forma de disminuir el peso empleando nuevas tecnologías y nuevos materiales, desarrollar nuevos motores con más empuje y menos consumo, y mejorar la aerodinámica de la aeronave. Con ello llegó el titanio, un material menos denso que el acero y con mejor resistencia a la corrosión y a la fatiga, además de soportar bien las altas temperaturas. El principal inconveniente era su alto coste.

Los avances tecnológicos durante y tras la Segunda Guerra Mundial dieron lugar a la aparición de los materiales compuestos, también llamados *composites*. Al inicio se utilizaban solo en pequeñas partes de la estructura del avión y en componentes de cabina. Pero a finales del siglo XX se fueron implementando en mayor medida y, actualmente, representan un porcentaje muy alto del total de materiales de un avión. Estos materiales son muy ligeros y resistentes, y no necesitan tornillos ni juntas para el ensamblaje. Además, pueden adoptar formas muy complejas (que serían difíciles de obtener con metales), y se comportan de manera similar a la madera debido a su constitución de varias capas apiladas. Esto permite combinar diferentes materiales para obtener un material con aquellas propiedades que se deseen.

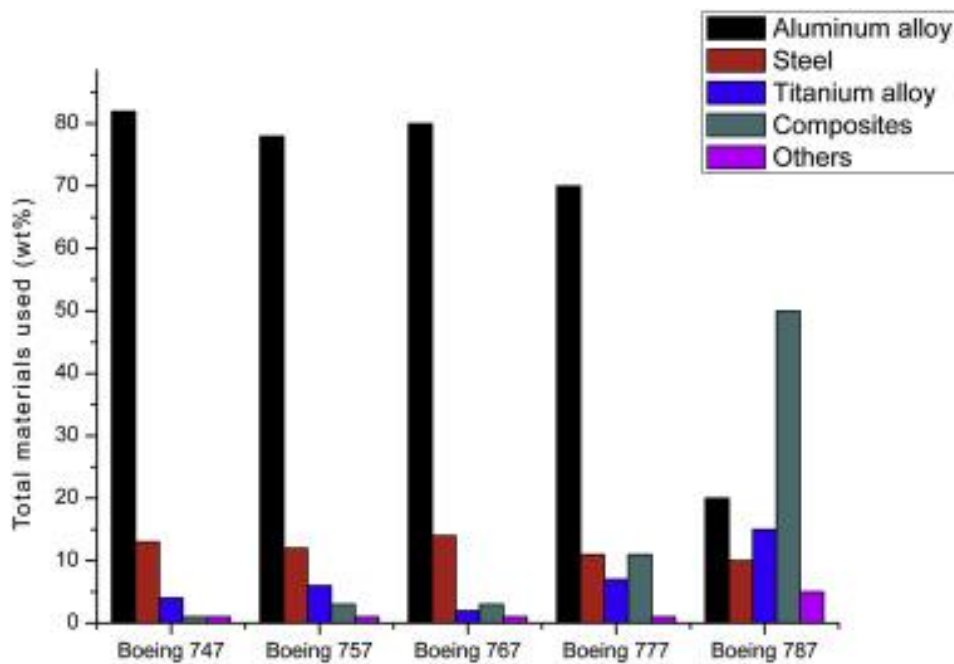
Así pues, con los materiales compuestos se ha conseguido reducir el peso de la aeronave, lo que se traduce a disminuir el consumo de combustible y aumentar el alcance. Esto permite a la vez un mayor respeto al medioambiente. Entre los

más usados en la actualidad, cabe destacar los materiales compuestos de matriz orgánica o polimérica como los CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Plastics*) y los GFRP (*Glass Fiber Reinforced Plastics*) [4].

En la Figura 1.2 y Figura 1.3 se muestra, respectivamente, la evolución de los materiales utilizados en los últimos modelos de Airbus y Boeing, dos de los grandes fabricantes de aeronaves a nivel mundial.



**Figura 1.2** Materiales utilizados en diferentes modelos de Airbus



**Figura 1.3** Materiales utilizados en diferentes modelos de Boeing

El uso de materiales en los aviones se puede extrapolar en el sector espacial, ya que se emplean los mismos materiales. Sin embargo, las naves espaciales (ya sean cohetes, satélites u otros vehículos) tienen unos requisitos mucho más específicos debido a que deben trabajar en condiciones muy extremas, donde hay carencia de gravedad, exposición a radiaciones, cambios de temperatura extremos, etc. Por tanto, aunque los materiales sean los mismos, las aleaciones particulares utilizadas pueden diferir entre ambos sectores.

## **1.2. Propiedades y aplicaciones de los materiales**

Este proyecto se centra en el estudio de los materiales más utilizados actualmente en la industria aeroespacial: el aluminio, el titanio y los materiales compuestos.

A continuación, se detallan las principales características de cada material y su uso específico en la industria aeroespacial.

### **1.2.1. Aluminio**

Los materiales utilizados en la estructura de las aeronaves deben ser capaces de no agrietarse ni corroerse, además de soportar daños por impactos o demás condiciones ambientales como altas o bajas temperaturas, impacto de rayos, lluvia o granizo, etc. Deben presentar buenas propiedades mecánicas y ser muy ligeros. Este último factor es el que determina la eficiencia de un vuelo y su coste, teniendo en cuenta la relación combustible consumido y distancia alcanzada [6].

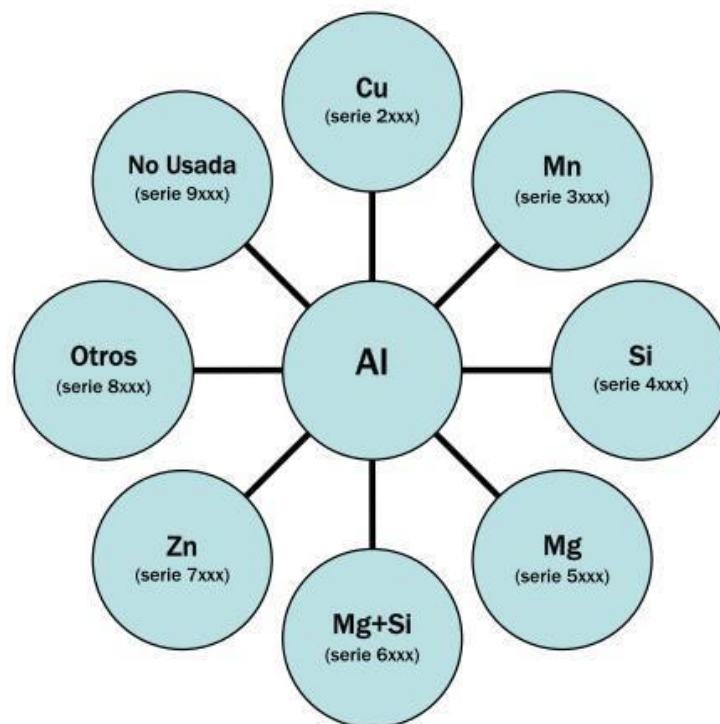
Así pues, el aluminio ha sido el principal material utilizado en las estructuras de las aeronaves desde que empezó a sustituir la madera. No obstante, sus propiedades en estado puro no son suficientes como para utilizarlo directamente, de manera que se mejoran mediante aleaciones donde se obtienen diferentes resultados en cada una. Estas aleaciones permiten mejorar y optimizar las propiedades para poder conseguir uno de los metales más versátiles, económicos y atractivos, con una amplia variedad de aplicaciones no sólo del ámbito aeroespacial, sino en muchos otros ámbitos de ingeniería e incluso en la vida cotidiana.

En general, este metal es muy ligero y a la vez resistente, perfecto para el diseño y construcción de estructuras de vehículos aeroespaciales. Su ductilidad y su bajo punto de fusión facilitan mucho su procesado y hace que sea muy maleable, pudiendo conseguir cualquier forma deseada. Tiene una excelente conductividad térmica y eléctrica, aunque en algunas aleaciones puede presentar una gran resistividad eléctrica. Al contrario que la madera, este material aleado y tratado es capaz de resistir problemas de corrosión frente al agua marina y demás agentes físicos y químicos. Esto es posible gracias a una capa muy fina de óxido de aluminio que se crea al combinarse la estructura de aluminio con oxígeno, proceso conocido como pasivación [7].



Aunque en los últimos años ha disminuido su uso en la industria aeroespacial, se están desarrollando nuevas aleaciones con mejores propiedades para hacer frente a aquellos materiales que lo quieren sustituir. La innovación de nuevas aleaciones y nuevos métodos de procesamiento, junto con lo ya existente, hace que siga siendo un material muy atractivo para las futuras generaciones de aeronaves, donde se busca una mejor relación ligereza-resistencia, alcance, seguridad y bajo coste de los vuelos.

En la Figura 1.4 se puede ver los principales elementos con los que se alea el Al, y cómo se designa cada una de las aleaciones. Hay que tener en cuenta que en estas aleaciones se les puede añadir otros elementos para modificar sus propiedades.



**Figura 1.4** Aleaciones del aluminio

En general, estas aleaciones tienen una buena resistencia de tracción, y son capaces de soportar grandes esfuerzos sin romperse. No obstante, en estos casos donde se tiene una gran resistencia, el metal es más susceptible a presentar problemas por corrosión.

Las aleaciones de Al más utilizadas en la industria aeroespacial son las 2XXX y las 7XXX, aunque también se utilizan algunas 5XXX, 6XXX. Además, en los últimos años la industria del aluminio está apostando por el uso de aleaciones de aluminio recicladas y el desarrollo de aleaciones como las de aluminio y litio (8XXX). Estas aleaciones pueden reducir el peso de los vehículos aeroespaciales entre un 7 y un 20 por ciento, lo que podría suponer un ahorro

en los costes. Y aunque presentan excelentes propiedades mecánicas, tienen algunos inconvenientes como el elevado coste del litio o su alta toxicidad y reactividad.

En el Anexo B se encuentran detalladas las características principales del aluminio y sus aleaciones, así como las aplicaciones específicas que tiene el metal dentro de la industria aeroespacial.

### 1.2.2. Titanio

La demanda de titanio se ha visto incrementada a lo largo de los años desde que se empezó a utilizar en la industria aeroespacial. El empleo de este material en el sector mejora el peso total de la aeronave, lo que significa una reducción del consumo de combustible. Esto es posible gracias a sus excelentes propiedades, a su buena compatibilidad con *composites* y a su buen comportamiento en condiciones de ingravidez y de temperaturas extremas. Por lo que este metal es considerado uno de los más atractivos a pesar de su alto coste y de las dificultades para extraerlo, procesarlo y fabricarlo [8].

El titanio es un metal muy ligero ya que presenta una buena relación entre resistencia mecánica y densidad, aunque tiene una densidad de casi el doble de la del aluminio. En general, sus propiedades mecánicas son excelentes, y su elevada temperatura de fusión y buena resistencia a la corrosión le permiten trabajar en condiciones extremas [9] [10].

Por una parte, el titanio presenta dimorfismo, es decir, en estado puro su estructura es HCP (*Hexagonal Close Packet*) (fase  $\alpha$ ), mientras que a 883°C y mediante una transformación alotrópica su estructura pasa a ser BCC (*Body Centered Cubic*) (fase  $\beta$ ). De esta manera se pueden clasificar las aleaciones dependiendo de su microestructura: aleaciones tipo alfa ( $\alpha$ ), tipo beta ( $\beta$ ) y tipo alfa-beta ( $\alpha/\beta$ ). Esta última aleación se clasifica a su vez en aleaciones casi- $\alpha$  y casi- $\beta$ , dependiendo de si la estructura a temperatura ambiente es mayoritariamente  $\alpha$  o  $\beta$ . Además, se pueden añadir diferentes elementos que estabilizan las diferentes fases para modificar y obtener una gran variedad de aleaciones de titanio con distintas propiedades. Estos elementos se clasifican en estabilizadores de la fase  $\alpha$  (si elevan la temperatura de la transformación) y estabilizadores de la fase  $\beta$  (si la disminuyen). En el primer tipo de estabilizadores se encuentran elementos como el aluminio, oxígeno, carbono y nitrógeno, mientras que en el segundo tipo destacan el vanadio, el molibdeno y el tántalo.

Por otra parte, este elemento tiene una elevada reactividad (sobre todo a temperaturas altas) por lo que es difícil obtener el metal puro. Por esta razón se trabaja con titanio que contiene diferentes niveles de impurezas de elementos como nitrógeno, carbono, oxígeno, hierro e hidrógeno, entre otros. De este modo el titanio comercial sin alear se clasifica en grados en función del contenido de impurezas de N (nitrógeno), C (carbono), O (oxígeno), Fe (hierro) y H (hidrógeno).

En general, las aleaciones de titanio son muy resistentes, comparables con las superaleaciones de hierro. Se comportan bien a temperaturas de entre 538°C y 595°C, dependiendo de la aleación. Son muy ligeras, y presentan una excelente resistencia a la corrosión gracias a una capa de óxido que se forma debido a su alta reactividad con el oxígeno. Así mismo, son muy dúctiles, fácilmente forjables y mecanizables, y además poseen bajos coeficientes de conductividad y expansión térmica, por lo que no cambia su forma en respuesta a los cambios de temperatura. Al igual que el aluminio, el titanio puede procesarse mediante forja o fundición. No obstante, el principal inconveniente de este metal es su alto coste.

Se emplea en una gran variedad de campos como el de la medicina, la industria energética, química, naval y militar, entre otros. En el sector aeroespacial el titanio se utiliza principalmente en motores, aunque también en elementos estructurales de las aeronaves. Además, este metal puede reemplazar al aluminio cuando se requiere que el material trabaje a temperaturas muy elevadas, o al acero para reducir el peso.

En el Anexo C se encuentran detalladas las principales características del titanio y sus aleaciones, así como las aplicaciones que tiene dentro del sector aeroespacial.

### 1.2.3. Materiales compuestos

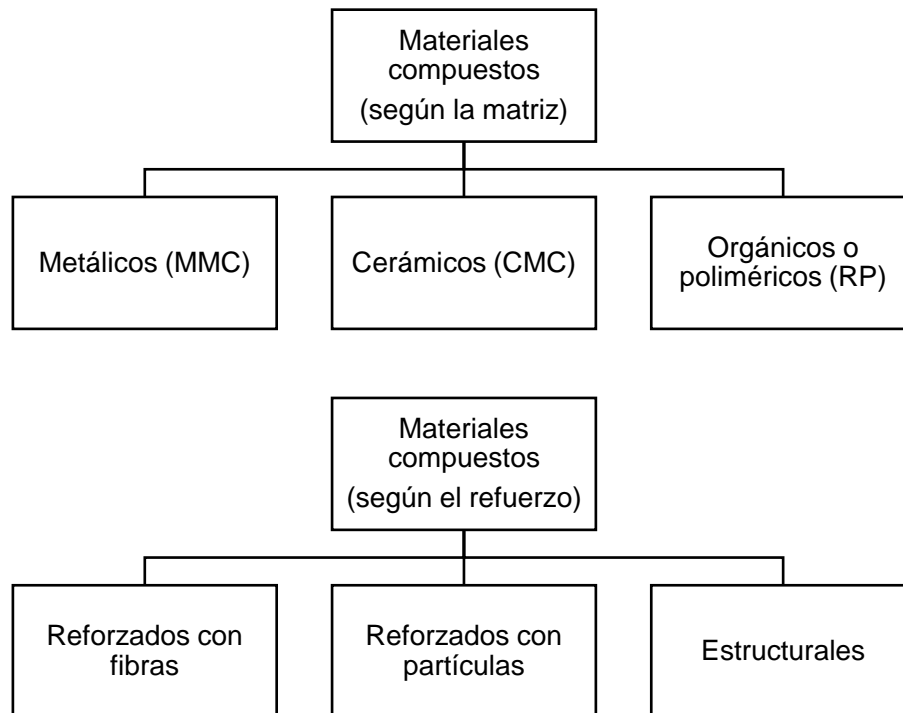
Un material compuesto o *composite* es aquel que está formado por combinaciones macroscópicas de dos o más elementos distintos que tienen una interfase discreta y reconocible que los separa uno del otro. Es decir, es aquel formado por distintos materiales sin que se produzca ninguna reacción química, consiguiendo un material resultante con mejores propiedades (heterogéneas) que las que presentan los materiales por sí solos. Los componentes que forman dicho material compuesto son la matriz y el refuerzo, además de la interfase [11].

Por un lado, la matriz es la fase continua, donde el refuerzo queda embebido. Sus funciones son dar estabilidad al conjunto transmitiendo las cargas al refuerzo, proporcionar la cohesión entre los elementos del refuerzo, además de protegerlo, soportarlo, y evitar la propagación de grietas.

Por otro lado, el refuerzo es la fase discontinua que se agrega a la matriz para mejorar conjuntamente las propiedades (como la resistencia y la rigidez, entre otras) del material compuesto.

La interfase es el elemento de contacto entre los dos componentes del material. Es indispensable tener una buena adhesión entre matriz y refuerzo para que el material cumpla con sus funciones.

Los materiales compuestos pueden clasificarse tal como se muestra en la Figura 1.5.



**Figura 1.5** Clasificación de los materiales compuestos

Los materiales compuestos proporcionan una alta relación ligereza-resistencia, rigidez y resistencia a la fatiga. Además, no suelen presentar problemas de corrosión y su proceso de fabricación es bastante fácil, pudiendo obtener formas complejas.

Estos materiales se utilizan principalmente en elementos estructurales de vehículos aeroespaciales.

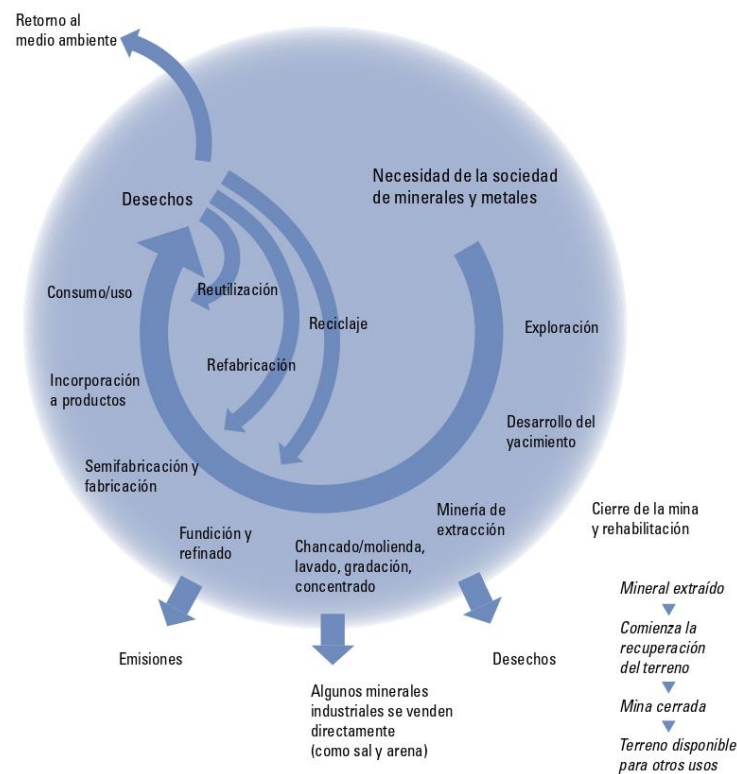
La clasificación, características y aplicaciones de los materiales compuestos se encuentran detalladas en el Anexo D.

## CAPÍTULO 2. Explotación de los recursos naturales en la Tierra

La corteza terrestre proporciona una gran cantidad de recursos naturales no renovables (tales como minerales o combustibles fósiles) que se utilizan para abastecer a la sociedad. Dichos recursos se han ido formando a lo largo de los años mediante diversas transformaciones naturales que han dado lugar a los yacimientos existentes actualmente en el planeta.

Los recursos extraídos se tratan y se transforman mediante distintos procesos para conseguir materiales necesarios para la industria y la sociedad. Una vez acaba su vida útil, estos materiales se convierten en residuos que necesitan ser gestionados para disminuir su cantidad y sus efectos negativos contra el medioambiente, de manera que se les pueda sacar algún provecho. Existen diferentes estrategias para gestionar estos residuos, tomando como primera opción minimizarlos, y siguiendo con reutilizarlos, reciclarlos, aprovechar su energía, tratarlos y finalmente depositarlos en vertederos.

En la siguiente imagen (Figura 2.1) se puede observar el ciclo de vida común de los materiales.



**Figura 2.1** Ciclo de vida de los materiales

En los siguientes apartados se analiza la explotación de los recursos naturales en la Tierra para obtener los materiales de estudio de este proyecto: aluminio, titanio y materiales compuestos. Para ello, se estudia de donde proviene el material, cómo se extrae, cómo se obtiene y, por último, se analiza su reciclaje.

## **2.1. Aluminio**

El aluminio es el tercer elemento más abundante en la corteza terrestre, conteniendo un 8% de los compuestos de aluminio. Se encuentra principalmente en yacimientos de minerales como la bauxita, la alunita, la nefelina, y en otros elementos como la arcilla [12].

Aun así, la principal mena de la cual se extrae el aluminio a nivel mundial es la bauxita, ya que su coste de explotación es el más económico comparado con el resto, además de disponer de numerosas reservas en todo el mundo y de tener un alto contenido de óxido de aluminio.

### **2.1.1. Bauxita**

La bauxita es una roca formada por la erosión expuesta durante millones de años de rocas ígneas o magmáticas, sedimentarias y metamórficas en zonas tropicales o subtropicales, donde las condiciones ambientales son muy húmedas. Está formada por diferentes óxidos de aluminio hidratados, aluminosilicatos hidratados, óxido e hidróxido de hierro, óxido de titanio y sílice. Contiene diferentes minerales como la bohemita, la gibbsita y el diásporo entre otros [13].

Los yacimientos de bauxita más importantes a nivel mundial se encuentran en Guinea, Australia, Vietnam, Brasil, Jamaica, Indonesia, China, India, Rusia, Malasia y Estados Unidos [14].

### **2.1.2. Proceso de extracción del mineral**

La bauxita se extrae principalmente de minas próximas a la superficie (minas a cielo abierto) tal como se observa en la Figura 2.2, aunque también se puede extraer de minas subterráneas. El proceso de extracción es simple y varía en función de cada localización, ya que el grado de mecanización es diferente y puede variar desde maquinaria pesada para movimientos de tierra y mineral hasta métodos manuales de extracción.

Para extraer el mineral, primero se despeja el terreno de vegetación que pueda haber, recolectando las semillas para su posible reimplantación. Después se saca la capa superficial del suelo y el subsuelo mediante excavadoras y otros utensilios para usarlo posteriormente en la recuperación del terreno, y la capa

que hay entre el suelo y la bauxita. A continuación, se extrae el mineral rasgándolo con excavadoras, perforándolo o mediante voladuras. Una vez la bauxita está suelta, se carga en camiones y se lleva a triturarla y clasificarla. Luego se transporta a plantas de beneficio o tratamiento, donde se aumenta el grado de calidad del mineral si es necesario, y se lava y almacena. Paralelamente se trabaja en la recuperación del terreno ya que la explotación conlleva grandes movimientos de tierra. Por último, se transporta el mineral a las refinerías de alúmina donde empieza el proceso de obtención del aluminio [15].



**Figura 2.2** Extracción de bauxita en una mina a cielo abierto

### 2.1.3. Proceso de obtención del aluminio

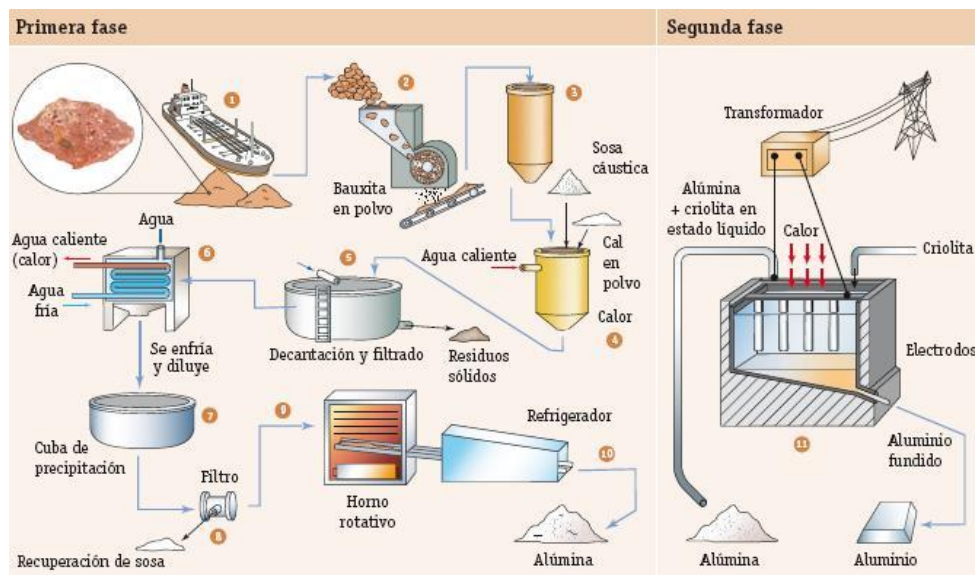
El proceso de obtención del aluminio primario consta de dos fases: obtención de la alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) a partir de la bauxita mediante el proceso de Bayer en refinerías, y fabricación del metal de aluminio mediante el proceso de Hall-Héroult [12]. En la Figura 2.3 se representa de manera esquematizada cada una de estas fases.

En primer lugar, se muele la bauxita en vía húmeda para reducir las dimensiones y se calienta con sosa cáustica ( $\text{NaOH}$ ) para obtener una solución de aluminato sódico ( $\text{AlO}_2\text{Na}$ ). Esta solución se decanta, clarifica y filtra para separarla de las impurezas de silicio, hierro y titanio, entre otras, que forman los residuos sólidos llamados lodos rojos. Después, del aluminato sódico se precipita el hidróxido de aluminio ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) mediante dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) o el propio hidróxido de aluminio. Por último, se calcina el hidróxido para eliminar el agua de constitución, y se obtiene finalmente la alúmina.



En segundo lugar, se realiza un baño electrolítico en un horno donde se disuelve la alúmina mediante criolita ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ) y demás elementos como fluoruro cálcico ( $\text{CaF}_2$ ), fluoruro de aluminio ( $\text{AlF}_3$ ), etc. En este proceso electrolítico se obtiene aluminio y oxígeno. El aluminio se deposita en el electrodo negativo (cátodo) y se precipita al fondo del horno, donde se extrae periódicamente en forma de láminas, tochos o lingotes para su fundición, mientras que el oxígeno se combina con el carbono del electrodo positivo (ánodo) y se produce monóxido y dióxido de carbono, además de otros elementos muy contaminantes como flúor. Después, el aluminio fundido se afina y se cuela en hornos para acabar de eliminar las impurezas y restos de hidrógeno, y finalmente se trata y se añaden elementos aditivos para obtener las aleaciones comerciales deseadas.

Una vez producido el metal deseado, se realiza el proceso de transformación metalúrgica para conseguir las formas y características determinadas para cada una de sus aplicaciones. Para ello, el aluminio se puede transformar y obtener en forma de extrusión, lamina, fundición, cables e hilos y polvo [16].



**Figura 2.3** Proceso de obtención del Al

Con esto, las plantas de fabricación de aluminio consumen grandes cantidades de electricidad y de materia prima. De 4 toneladas de bauxita se obtienen 2 toneladas de alúmina, donde finalmente se fabrica 1 tonelada de aluminio [17].

#### 2.1.4. Reciclaje

El reciclaje del aluminio es un proceso muy ventajoso que ofrece numerosos beneficios tanto medioambientales, como económicos y sociales [18]. El aluminio reciclado se conoce como aluminio secundario.



Desde el punto de vista técnico el proceso de reciclaje es bastante fácil. Consiste básicamente en [19]:

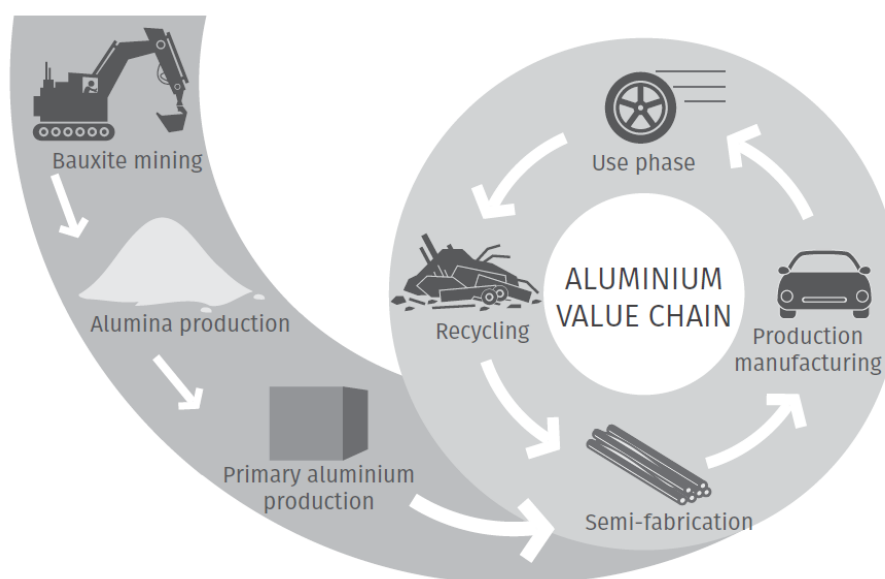
- Recoger los desechos (que pueden ser nuevos o viejos dependiendo de si provienen del proceso de producción del aluminio o del final de su ciclo de vida).
- Clasificar y tratar los desechos en función del tipo de producto y aleación para controlar las impurezas y la composición.
- Refundir y/o refinar los restos.

Desde que se empezó a utilizar el aluminio comercialmente, este proceso ha sido ampliamente utilizado para contribuir a la producción total del metal. De forma que el 75% de aluminio producido en el mundo se sigue utilizando hoy en día.

Por un lado, para producir 1 tonelada de aluminio secundario usando residuos del metal, tan solo se requiere el 5% de la energía necesaria para producir 1 tonelada de aluminio primario, de manera que se reducen mucho los costes. Además, se puede reciclar indefinidamente el 100% del aluminio producido sin perder sus propiedades para obtener el mismo producto de antes u otro completamente distinto. Por lo que el aluminio reciclado se puede volver a utilizar en cualquier aplicación.

Por otro lado, este proceso permite reducir la contaminación del medio ambiente. Entre otros aspectos, se evita la destrucción del suelo y los problemas que esto conlleva, y se reducen las emisiones de CO<sub>2</sub> en un 84% respecto al proceso de producción del aluminio primario.

Con la producción de aluminio primario y secundario definida, el ciclo de vida de este metal se cierra tal como se muestra en la Figura 2.4.



**Figura 2.4** Ciclo de vida del aluminio

## 2.2. Titanio

El titanio es el noveno elemento más abundante de la corteza terrestre, conteniendo aproximadamente un 0,8% de óxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ). Se encuentra en la corteza terrestre en numerosos minerales de óxidos y silicatos, tales como el rutilo, la ilmenita, la anatasa, la brookita y el leucoxeno [20].

Sin embargo, los minerales explotables económicamente son la ilmenita, que proporciona el 89% de la producción de Ti a nivel mundial, y el rutilo (constituye el resto de la producción) [14].

### 2.2.1. Ilmenita y rutilo

Por un lado, la ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ) es un mineral que se encuentra en rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, además de en playas de arena negra pesada formada por el desgaste y fragmentación de rocas. El mineral está formado por óxido de hierro y titanio en presencia de magnesio y manganeso. Contiene aproximadamente un 50% de óxido de titanio, y su forma cristalina se puede modificar mediante un proceso llamado intemperismo que produce un mineral alterado que puede pasar a ser leucoxeno si contiene más de un 70% de óxido de titanio.

Por otro lado, el rutilo ( $\text{TiO}_2$ ) también se encuentra en las rocas como en el caso de la ilmenita, aunque se extrae principalmente de la arena de las playas. Está formado por óxido de titanio y demás elementos como hierro, tántalo, niobio, cromo, vanadio y estaño.

Las reservas más importantes de ilmenita se encuentran en Australia, China, India, Sudáfrica, Kenia, Brasil, Madagascar, Noruega, Canadá, Mozambique, Ucrania, Estados Unidos y Vietnam. En cuanto a las de rutilo, las más significativas se encuentran en Australia, Kenia, Sudáfrica, India, Ucrania, Mozambique, Sierra Leona y Estados Unidos [14].

### 2.2.2. Proceso de extracción de los minerales

Tanto la ilmenita como el rutilo se extraen principalmente de arena mineral pesada que puede encontrarse húmeda o bien seca. Por tanto, se consideran también minas a cielo abierto.

El proceso comienza, al igual que en la bauxita, limpiando la zona de vegetación que pueda haber, recolectando semillas y sacando la capa superior del suelo y el subsuelo usando excavadoras para la posterior recuperación del terreno.

Por un lado, cuando la arena está mojada se extrae utilizando dragas de rueda de cangilones, cabeza cortante o similares. En numerosas ocasiones se crea un

estanque artificial por donde va pasando la draga flotante y va sacando la arena. A continuación, se bombea la arena por una tubería y se lleva a la planta de tratamiento, que suele estar flotando detrás de la draga (ver Figura 2.5).



**Figura 2.5** Sistema de draga y planta de tratamiento flotante

Por otro lado, si la arena está seca se extrae utilizando excavadoras y demás maquinaria, y se carga en camiones o en cintas transportadoras para llevarla a la planta de tratamiento.

Una alternativa a estos métodos es el uso de monitores hidráulicos, que utilizan agua a presión para sacar y arrastrar la arena (ya sea húmeda o seca).

En la planta de tratamiento se llevan a cabo diferentes métodos para separar el mineral del barro, el cuarzo y demás elementos. Estos métodos consisten en la separación por tamaño, la gravitacional, la electrostática o la magnética. Una vez el mineral se ha separado, se transporta a las refinerías para la obtención del titanio. Así mismo, se empieza a trabajar con la recuperación del terreno, que se estima que tarda unos 10 años en recuperarse [21].

### **2.2.3. Proceso de obtención del titanio**

El proceso utilizado para obtener titanio es el conocido como Kroll. Este proceso permite reducir los óxidos de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) de la ilmenita o el rutilo a titanio esponja, para luego obtener el titanio metálico. A pesar de ser el método más utilizado, es el más caro, complicado y poco eficiente [22].

Si el mineral de partida es la ilmenita, esta se debe tratar previamente para extraer el hierro y obtener un mineral constituido principalmente de óxido de titanio.

Primero se realiza la cloración del óxido de titanio mediante un proceso de fluidización a alta temperatura para extraer impurezas del mineral. Para ello, se introduce cloro en forma de gas en la parte inferior de un lecho y se obtiene tetracloruro de titanio ( $\text{TiCl}_4$ ) en presencia de monóxido y dióxido de carbono en la parte superior.

A continuación, se llevan estos productos a la unidad de destilación fraccionada, donde se eliminan las impurezas de bajo punto de ebullición (como el  $\text{CO}$  y el  $\text{CO}_2$ ) y las de alto punto de ebullición. Después, el  $\text{TiCl}_4$  se purifica y se almacena en un reactor de atmósfera inerte.

Luego se realiza la reducción del tetracloruro de titanio en el reactor utilizando magnesio. De esta manera se obtiene el titanio esponja. Este último proceso puede realizarse utilizando sodio fundido (lo que se conoce como método Hunter), pero es menos común por su alto coste.

Por último, se elimina el  $\text{MgCl}_2$  del titanio esponja mediante diferentes métodos como la destilación en vacío, el barrido de gas inerte o la lixiviación. Este último se realiza en otro reactor, por lo que es el menos utilizado.

Una vez se obtiene el titanio esponja puro, se tritura y trocea y se añaden los elementos necesarios para producir la aleación deseada.

En general, el proceso de obtención del titanio es bastante costoso debido a su alta reactividad. Se requieren reiteradas fundiciones y acondicionamientos especiales que desperdician gran parte de titanio para obtener un metal lo más puro posible. De manera que, las dificultades en la extracción del titanio a partir de óxidos y su posterior transformación son las causantes del elevado coste final del producto.

#### **2.2.4. Reciclaje**

Al igual que el aluminio, el proceso más común de reciclaje del titanio consta en: recolecta de los desechos (nuevos o viejos), clasificación y refundición. Sin embargo, en este caso el proceso de refundición no es tan efectivo ya que no permite eliminar todas las impurezas presentes en el metal. De manera que solo se puede realizar el proceso en desechos que estén poco contaminados y bien clasificados en función de su composición. Esto afecta, a su vez, en el número de veces que se puede reciclar [23]. Además de esto, hay que tener en cuenta los costes de reciclaje respecto al precio final del producto (que suele ser bastante alto).

En general, los desechos viejos se utilizan en pocas ocasiones para producir otra vez titanio. Por otro lado, durante el proceso de obtención del metal se generan

grandes cantidades de desechos de titanio, por lo que la mayoría de titanio reciclado proviene de los desechos nuevos [24].

Los desechos que no pueden reciclarse se utilizan de aditivos para la producción de otros metales (como el ferro titanio) o bien acaban en el vertedero esperando a que los precios del titanio varíen para poder sacarle provecho.

Existen diferentes métodos alternativos para reciclar el titanio, aunque aún no hay ninguno que destaque por su eficiencia y ahorro en costes. Además, la generación de desechos seguirá aumentando debido al interés y mayor uso del metal en la industria. Es por esto que se necesita seguir investigando y desarrollando nuevos métodos para poder reciclar de manera efectiva este metal, reduciendo costes, energía y contaminación.

## 2.3. Materiales compuestos de matriz orgánica

Como se ha visto anteriormente (1.2.3), los materiales compuestos pueden estar formados por numerosas combinaciones de distintos materiales. Debido al creciente interés y utilización de los RP (*Reinforced Plastics*), este proyecto se centra en la obtención de materiales compuestos de matriz polimérica, esto es, los *composites* que se obtienen a partir de polímeros. De manera que la principal base de estudio será el plástico.

Los polímeros son macromoléculas, es decir, largas cadenas de moléculas formadas por monómeros. Según su origen, los polímeros pueden ser naturales (se obtienen de los seres vivos), sintéticos (se obtienen por síntesis industrialmente) o semisintéticos (se obtienen por transformación de los naturales). Además, según sus propiedades térmicas se pueden clasificar en: termoplásticos (se funden con calor), termoestables (no se funden con calor, sino que se endurecen) y elastómeros (tienen la capacidad de recuperar su forma inicial al deformarlos a temperatura ambiente) [25].

En este apartado se explica el proceso para obtener los RP a partir del petróleo, unas de las materias primas más importantes y extensamente utilizadas, y principal fuente de energía a nivel mundial. Este proceso está basado, de manera general, en la extracción del petróleo, la obtención de los monómeros del petróleo, la polimerización i la obtención del material compuesto.

### 2.3.1. Petróleo

El petróleo es un compuesto químico formado por hidrocarburos constituidos por átomos de carbono e hidrógeno, además de otros componentes como nitrógeno, azufre u oxígeno entre otros [26]. Este compuesto es considerado un combustible fósil, y se suele encontrar en yacimientos de roca sedimentaria, en forma líquida y mezclado con gases y agua.

Los polímeros derivados del petróleo pertenecen al grupo de los sintéticos, y solamente el 4-6% de la producción mundial de petróleo se destina a la producción de plásticos [27].

Las principales reservas de petróleo se encuentran en Venezuela, Arabia Saudí, Canadá, Irán, Iraq, Kuwait, Rusia y Emiratos Árabes [28].

### 2.3.2. Proceso de extracción del petróleo

El petróleo se encuentra en yacimientos estratigráficos, anticlinales y en falla. De manera que se extrae mediante el método de rotación [26]. Este método consiste en un sistema de tubos que van girando y perforando el suelo hasta llegar a la bolsa de petróleo encontrada. A la vez que se perfora, se van recubriendo las paredes del pozo con placas de acero para que este no se derrumbe.

Cuando la broca perfora la roca, el petróleo y el gas que lo acompaña van subiendo lentamente debido a la diferencia de presiones que hay a esa profundidad y debido al empuje que ejerce el agua que está por debajo de la bolsa. Cuando el petróleo ya no sube más por sí solo, se bombea con un sistema determinado para que llegue hasta la superficie, tal como se muestra en la Figura 2.6. Para ayudar a subir el petróleo más fácilmente, se realiza un pozo paralelo a través del cual se inyecta agua o bien vapor en la bolsa de petróleo. Este proceso de extracción se realiza hasta que el coste de extracción supera la rentabilidad que se obtiene del petróleo.



**Figura 2.6** Sistema de bombeo de petróleo

Gran parte del petróleo se obtiene del fondo del océano, por lo que en numerosas ocasiones se emplean plataformas de perforación submarina.

Si el suelo ha sido contaminado, este puede ser tratado con distintos métodos para intentar generar un menor impacto ambiental. Estos métodos pueden incluir

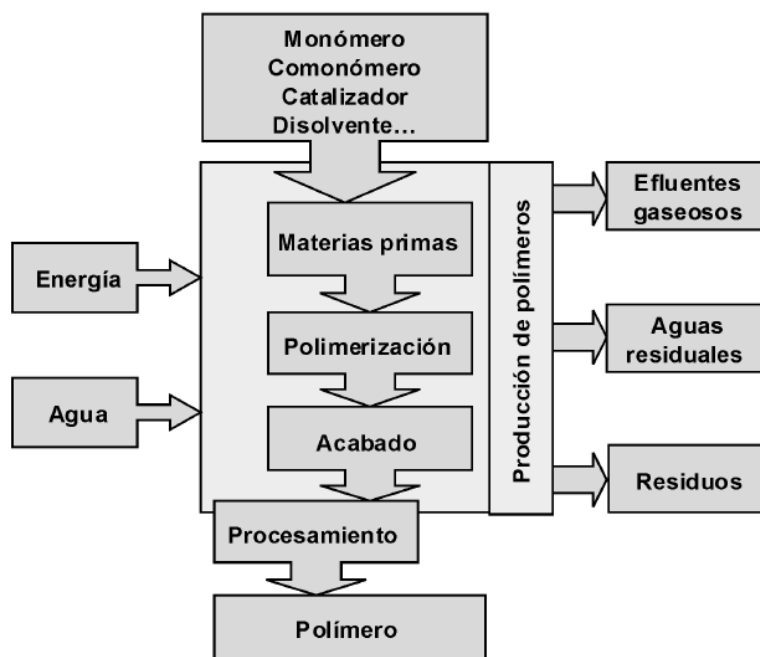
excavación y eliminación del suelo, biorremediación (con microorganismos que se alimentan de hidrocarburos), extracción de vapor, reutilización del suelo para otros fines, etc. Lo mismo se puede hacer con el agua, bombeándola y tratándola posteriormente.

Una vez se extrae el petróleo crudo, hay que refinarlo para obtener productos utilizables. Este proceso de refinación consta de tres partes: destilación, conversión y tratamiento. El proceso de destilación consiste en separar los diferentes componentes del petróleo crudo (previamente calentado) en una torre de fraccionamiento, de manera que las fracciones más ligeras quedan depositadas en la parte superior y las más pesadas en el fondo. La conversión se realiza para transformar los productos y mejorarlos, rompiendo sus moléculas mediante las técnicas de *cracking* y reformado. Por último, el proceso de tratamiento consiste en eliminar las impurezas y mejorar la calidad de los productos con tratamientos como la alquilación o la isomerización, entre otros.

De esta manera se obtienen los monómeros necesarios para empezar con la síntesis de los polímeros.

### 2.3.3. Proceso de obtención de los RP

Los monómeros son los compuestos de partida para la síntesis de los polímeros, también conocida como polimerización. En la Figura 2.7 se representa el esquema general del proceso de producción de polímeros.

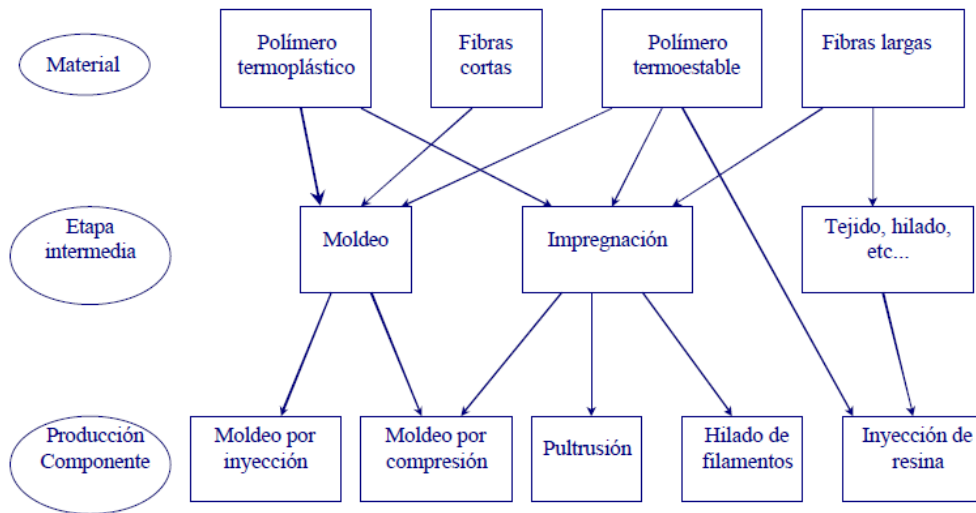


**Figura 2.7** Proceso de producción de los polímeros



Existen dos tipos de polimerización: por adición y por condensación [29]. Por un lado, la polimerización por adición se genera cuando un catalizador inicia la reacción separando las uniones de carbono en los monómeros. Luego, estos monómeros se juntan con otros monómeros sin perder sus subproductos, formando una larga cadena de monómeros. Este tipo de polimerización consta de tres etapas, que son la iniciación, la propagación y la terminación. Por otro lado, en la polimerización por condensación se produce una reacción que une los monómeros a la cadena a la vez que se pierden moléculas de subproductos que suelen ser de agua.

Una vez se obtiene el polímero, se procede a la fabricación de los materiales compuestos. En la siguiente imagen (Figura 2.8) se muestra algunos de los procesos de fabricación de los materiales compuestos de matriz orgánica con fibras.



**Figura 2.8** Métodos de fabricación de materiales compuestos poliméricos

### 2.3.4. Reciclaje

Los materiales compuestos también se reciclan para aprovecharlos de nuevo y sacar beneficios, teniendo en cuenta factores como el medioambiental y el económico. No obstante, en este caso el proceso de reciclaje puede resultar algo más complicado ya que estos materiales están formados por diferentes elementos.

En general, los residuos plásticos se pueden gestionar de varias maneras en función del tipo de plástico [30]:

- Reciclaje mecánico: limpieza, clasificación, trituración y lavado.
- Reciclaje químico: degradado del plástico mediante calor o catalizados.
- Recuperación energética: incineración de los residuos.



Concretamente hablando de polímeros, los termoplásticos son más fáciles de reciclar, ya que estos se pueden fundir y moldear sin alterar demasiado sus propiedades originales entre 5 y 7 veces. De tal manera que pueden emplearse en la fabricación de nuevos materiales, lo que puede suponer un ahorro en materia prima.

En cambio, los termoestables son más difíciles de reciclar ya que, si se funden, se alteran sus propiedades. Por lo que, una vez reciclados, se utilizan como refuerzo en algunos materiales o bien son aprovechados energéticamente gracias a su alto poder calorífico [31].

Los plásticos presentan una gran resistencia a la degradación y, puesto que provienen de una fuente no renovable y limitada como es el petróleo, el reciclaje de este material parece imprescindible para poder seguir utilizándolo en un futuro.

## **CAPÍTULO 3. Impacto de la explotación de recursos naturales**

En muchas de las actividades realizadas por el ser humano se genera un impacto hacia el medioambiente y/o hacia las propias personas, generando problemas cada vez más preocupantes para la sociedad. Uno de los grandes desafíos de la humanidad es conseguir beneficios a la vez que se minimizan todos estos impactos.

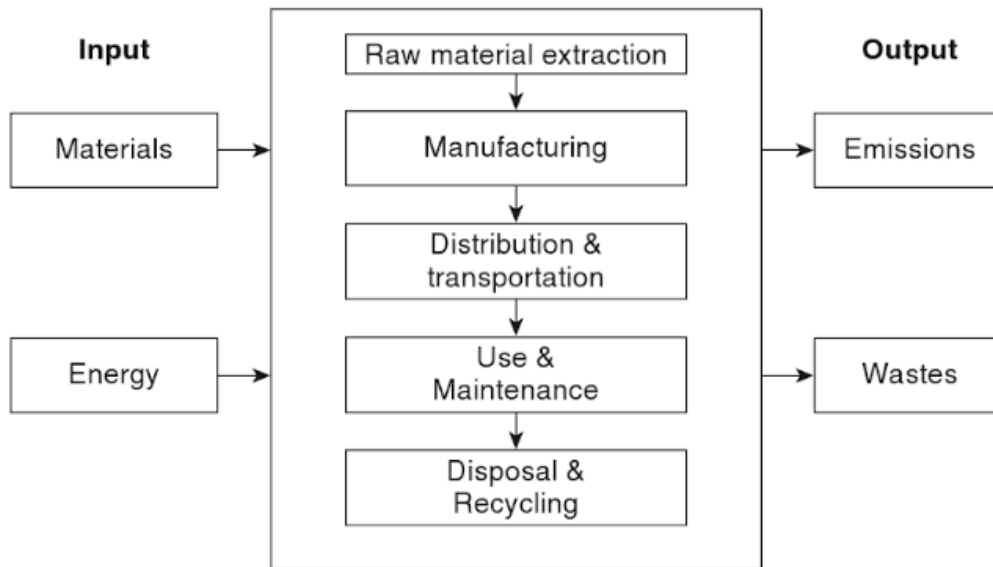
En este capítulo se analizan los diferentes problemas generados durante la explotación de los recursos naturales, una de las actividades con mayor potencial para afectar al medioambiente y a la sociedad. Esto es esencial para evaluar y estudiar futuros cambios e innovaciones tecnológicas relacionados con la ciencia y tecnología de los materiales.

Años atrás, los problemas relacionados con el medioambiente y la generación de residuos recibían poca atención. Pero está claro que el planeta, y por tanto el ser humano, ya está sufriendo las consecuencias de ello, como puede ser el cambio climático o la contaminación. Por esta razón, cada vez se habla más de sostenibilidad para cuidar y proteger el medioambiente. A su vez, la problemática medioambiental está directamente relacionada con el impacto social generado en las poblaciones cercanas a los yacimientos.

En cada una de las etapas de explotación de los recursos se genera un grave impacto: desde la exploración del yacimiento, la construcción de carreteras e infraestructuras, la extracción y procesamiento del recurso, y el cierre del yacimiento, hasta el proceso de producción de los materiales. No obstante, esto depende en gran medida de la localización geográfica, el gobierno, el clima, la población y su cultura, el desarrollo económico, la infraestructura y el desarrollo tecnológico. Por lo que estos problemas se suelen intensificar más en los países menos desarrollados.

A pesar de que este proyecto solo se centra en los procesos de explotación de dichos recursos, en realidad se genera un impacto durante todo el ciclo de vida de los materiales, ya sea también durante su transporte, uso, mantenimiento y proceso de reciclaje.

En la Figura 3.1 se representa el esquema de flujos de entradas y salidas durante el ciclo de vida de un material. Se entiende por entradas a todo lo necesario para poder explotar el recurso, esto es, materia prima (como agua o combustibles fósiles) y energía. Las salidas son todas las emisiones y residuos generados durante la actividad [32].



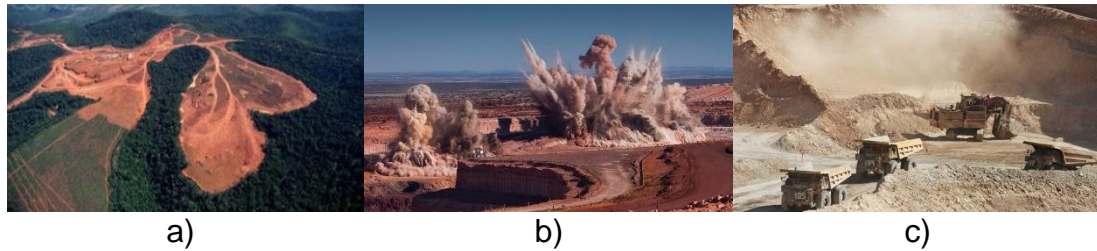
**Figura 3.1** Flujo de entradas y salidas del ciclo de vida de un material

A continuación, se analizan los diferentes impactos generados durante la explotación de los recursos naturales para obtener aluminio, titanio y plástico.

### 3.1. Impacto medioambiental

En cada fase de la actividad minera se genera un gran impacto ambiental: desde la exploración del yacimiento (que incluye los diferentes estudios, pruebas, construcción de carreteras e infraestructuras, etc), pasando por la extracción y procesamiento del mineral, hasta el cierre del yacimiento. No obstante, el impacto depende básicamente de la localización del yacimiento, de sus características y de la tecnología y los métodos empleados.

Normalmente las minas a cielo abierto (como las de bauxita, rutilo e ilmenita) generan un impacto mayor hacia el medioambiente. En general, la exploración y extracción de los minerales conlleva grandes movimientos de tierra que provocan la destrucción del terreno y del paisaje, la contaminación de aguas y la alteración y/o destrucción de vegetación y hábitats de fauna. Con ello, se contemplan distintos problemas como la deforestación, la pérdida de especies, la eliminación de biodiversidad y, en general, la aceleración del cambio climático. Además, se genera contaminación por polvo y por gases, ruido (debido a la maquinaria y a las voladuras) y grandes cantidades de residuos que en algunos casos pueden ser contaminantes [33]. Estos problemas también pueden afectar directamente a la salud de las propias personas que habitan en la cercanía de las minas. Algunos ejemplos del impacto generado en tal actividad se representan en la Figura 3.2.



**Figura 3.2** Ejemplos de impactos medioambientales en minas: a) destrucción del terreno, b) voladuras fuera de límites, c) contaminación por polvo

Las condiciones del terreno posteriores a la actividad minera son pésimas, ya que el terreno sufre transformaciones que imposibilitan el crecimiento de nueva vegetación, el hábitat de fauna y la integración del paisaje. A pesar de esto, cuando se da por concluido el proceso de extracción en ocasiones se trabaja en la recuperación del terreno.

El impacto medioambiental generado en los procesos de producción de los materiales es también muy importante. No obstante, esto depende en gran medida de las técnicas y métodos empleados para cada tipo de material.

En los diferentes procesos para producir aluminio a partir de bauxita se genera una gran contaminación atmosférica. Concretamente se emiten gases de efecto invernadero, tales como vapor de agua, óxidos de carbono ( $\text{CO}_x$ ), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ) y demás sustancias químicas y partículas de polvo que provocan lluvia ácida y son altamente contaminantes. También se generan aguas residuales (que deben ser tratadas antes de su vertido, reciclado o reutilización) y grandes cantidades de residuos como lodo o escoria. El reciclaje de estos residuos suele tener un coste bastante elevado [34]. En la Figura 3.3 se resume la problemática ambiental en cada uno de los procesos necesarios para obtener este metal.

ETAPA	PROBLEMÁTICA MEDIOAMBIENTAL	AFECCIÓN
ACONDICIONAMIENTO DE LA BAUXITA	C. ATMOSFÉRICA	Polvo
	C. RESIDUOS	Contiene Si, Fe, Ti, Ca y óxidos
	C. RUIDO	Molesta
LIXIVIACIÓN	C. HÍDRICA	Sólidos en suspensión
	C. RESIDUOS	"Lodo rojo" (óxidos metálicos y silicato aluminoso)
PRECIPITACIÓN Y LAVADO	C. HÍDRICA	Aguas residuales básicas
	C. RESIDUOS	Lodos con compuestos metálicos
CALCINACIÓN	C. ATMOSFÉRICA	Gases de combustión, vapor de agua y partículas
	C. RESIDUOS	Escorias y filtros usados
ELECTRÓLISIS	C. ATMOSFÉRICA	Gases con fluoruros, $\text{CO}_x$ , $\text{NO}_x$ , HAP, ect.
	C. HÍDRICA	Aguas ácidas
	C. RESIDUOS	Ánodos de carbono, filtros y refractarios gastados
AFINO	C. ATMOSFÉRICA	Polvo y gases (cloruros)
	C. HÍDRICA	Aguas con Fe, Si, alumina y carbones

**Figura 3.3** Impacto medioambiental en la producción de Al

En la producción de titanio también se emiten a la atmosfera altas cantidades de gases contaminantes, tales como CO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, etc. Así mismo, se generan diferentes residuos sólidos (como cloruros metálicos y magnesio) y líquidos que pueden ser altamente tóxicos. Algunos de estos residuos se pueden reciclar [35].

Existen una serie de variables que sirven para evaluar y cuantificar el impacto medioambiental. Algunas de estas variables son el GER (*Gross Energy Requirement*), el GWP (*Global Warming Potential*), el AP (*Acidification Potential*) y el SWB (*Solid Waste Burden*). Cuanto más alto son estos valores, más grave es el impacto generado. En el Anexo A se encuentran definidos cada uno de los términos.

En la Tabla 3.1 se muestran los valores específicos de estas variables por cada kg de metal producido, desde la extracción de los minerales hasta la producción del metal [36] (estos valores pueden variar dependiendo del país donde se explota el recurso).

Material	GER (MJ/kg)	GWP (kg CO <sub>2</sub> -eq/kg)	AP (kg SO <sub>2</sub> -eq/kg)	SWB (kg/kg)
Aluminio	211	22,4	0,131	4,5
Titanio	361	35,7	0,230	16,9

**Tabla 3.1** Evaluación del impacto ambiental del aluminio y el titanio

Los valores del GER de ambos materiales son relativamente pequeños, ya que el rango de valores de esta variable por cada kg de material producido es de 4 a 700.000 MJ. Lo mismo ocurre con el GWP, cuyo rango de valores oscila entre 0 y 35.000 kg de CO<sub>2</sub>-eq por cada kg de material producido. Los valores del AP también son relativamente bajos, ya que el AP del SO<sub>2</sub> es de 1 kg. No obstante, se puede observar que la explotación de los recursos para obtener titanio genera un mayor impacto hacia el medioambiente. Esto es, principalmente, debido a su complejo proceso de producción. Además, según el SWB, este metal genera una mayor cantidad de residuos.

Resulta interesante destacar que, aunque el impacto generado por cada kg de aluminio y titanio producido es relativamente bajo (en términos absolutos), estos dos materiales son de los metales que generan un mayor impacto ambiental. Además, este impacto se incrementa en gran medida debido a su alta producción anual (ver 4.3).

La actividad petrolera es también una de las actividades que más atenta contra el medioambiente y la biodiversidad. El impacto se genera en todas sus etapas: exploración, perforación y extracción.

La exploración, perforación y extracción de petróleo causan principalmente contaminación, deforestación y destrucción de ecosistemas. En general, se genera una gran contaminación principalmente debido a fugas y derrames del propio petróleo y demás componentes químicos. Esto afecta directamente al

suelo, al agua, al aire, a la vegetación y a la vida animal (especialmente en aves y peces). De manera que gran parte del terreno queda degradada, por lo que se genera un impacto tanto físico como visual. También se genera contaminación acústica debido al ruido de la maquinaria, y grandes cantidades de residuos sólidos y líquidos que son contaminantes. Además, se necesitan grandes cantidades de agua durante la exploración y extracción, que finalmente queda contaminada. Igualmente cabe destacar que en todas las fases existe un alto riesgo de incendios y explosiones [37].

En los procesos de refinado y producción de polímeros se emiten a la atmósfera partículas y gases como  $\text{CO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ , Ozono ( $\text{O}_3$ ), VOCs (*Volatile Organic Compound*), y demás productos químicos [38]. También se generan residuos que suelen ser reutilizados o reciclados.

Todo esto conlleva, a su vez, riesgos en la salud de los trabajadores y de los poblados cercanos al lugar de interés.

Dado la extensa variedad de plásticos que se pueden obtener, resulta difícil cuantificar el impacto medioambiental que se genera en las diferentes fases de producción.

Para concluir, los impactos medioambientales se potencian en los procesos de tratamiento de los minerales y recursos, y en los procesos de producción de los materiales. Y es que, además de la gran cantidad gases emitidos y residuos generados, se necesitan grandes cantidades de agua, energía y materia prima para transformar los minerales y demás recursos naturales y conseguir los productos finales [39]. No obstante, esto depende en gran medida de las técnicas y métodos empleados para cada tipo de material. En concreto, el titanio es uno de los materiales que más energía requiere debido a su complejo proceso de producción.

Igualmente, resulta importante tener en cuenta el transporte de estos elementos, especialmente el del petróleo a través de oleoductos, donde el principal problema es la contaminación por culpa de derrames.

### 3.2. Impacto social

El impacto social derivado de la explotación de recursos naturales se acentúa durante la actividad de extracción en un yacimiento, principalmente en las poblaciones circundantes al área de explotación.

Algunos de los problemas más serios y preocupantes son el desalojo y desplazamiento de poblados, la pérdida de formas tradicionales de vida y la pérdida de cultivo y ganadería. Además de pobreza, violencia, explotación de personas, represión, corrupción, etc. La Figura 3.4 resume los principales impactos sociales que se pueden generar durante la actividad minera [40].

Población y demografía	Inmigración, emigración, campamentos para los trabajadores, inclusión social, progreso o deterioro de los pueblos, conflicto y tensiones entre los grupos sociales
Infraestructura social y servicios	Demandas e inversiones en vivienda, habilidades (recortes y conservación de personal), atención infantil, salud, educación y capacitación
Crimen y orden social	Corrupción, violencia doméstica, violencia sexual, abuso y tráfico de sustancias, prostitución, cambios en las normas sociales, ritmo de cambio para las comunidades vulnerables
Cultura y costumbres	Cambio en los roles tradicionales de la familia, cambios en la producción y la base del empleo, efecto de la economía monetaria, participación reducida en la sociedad civil, cohesión de la comunidad, sentido de pertenencia, liderazgo en la comunidad, herencia cultural
Salud y seguridad de la comunidad	Enfermedades, accidentes de vehículos, caídas, abuso de sustancias y de alcohol, contaminación, interrupción del suministro habitual de alimentos, programas de concientización y tratamiento
Trabajo	Salud y seguridad, condiciones laborales, remuneración, derecho de reunión, representación en sindicatos, participación femenina en la fuerza laboral
Género y grupos vulnerables	Experiencia desproporcionada del impacto y de la marginación de los grupos vulnerables (por ejemplo: mujeres, discapacitados, ancianos, minorías étnicas, indígenas y jóvenes), igualdad en la participación y el empleo
Derechos humanos y seguridad	Abusos por parte del personal de seguridad (gobierno, contratista, compañía), desorden social en los campamentos, represión de manifestaciones, fijar como objetivo a los activistas, programas de concientización de los derechos

Figura 3.4 Impacto social de la actividad minera

Estos problemas suelen ser provocados por la mala gestión y administración de los gobiernos y empresas dedicadas a ello, y va ligado a la actividad económica del propio país. De manera que la problemática social se origina frecuentemente en países menos desarrollados.

Para concluir, la actividad minera implica una alteración física brutal del medioambiente, por lo que es importante que exista una conjunción entre una legislación ambiental y una actividad que respete al entorno y a la sociedad. Aquí entra en juego el término de sostenibilidad: una mina sostenible es aquella que incluye factores como el respeto de los derechos humanos, el riesgo, la salud y la seguridad de las personas, la conservación de la biodiversidad y del medioambiente, la ética del gobierno y de las empresas, los diferentes aspectos económicos, etc (ver Figura 3.5) [15].



Figura 3.5 Estándares de una mina sostenible

## CAPÍTULO 4. Disponibilidad de los materiales en la Tierra

El desarrollo de nueva tecnología en los últimos años ha sido uno de los factores clave en el aumento de la demanda de materiales y, por tanto, en el aumento del consumo de recursos naturales de la Tierra. Estos recursos son finitos y dependen principalmente del hombre, por lo que su explotación masiva provoca que aumenten sus niveles de escasez.

Este capítulo se centra en evaluar la disponibilidad y el agotamiento de los materiales y sus recursos naturales en la Tierra. Para ello, se estudia la producción de cada material y sus recursos disponibles. Mediante el R/P o RPR (*Reserves-to-Production Ratio*) se realiza una primera aproximación de los años que restan hasta el agotamiento. Después, se representa el pico de Hubbert con el fin de obtener de una manera más precisa el grado de agotamiento y tendencias futuras de cada material. Por último, se calcula el porcentaje de agotamiento para evaluar la cantidad de recurso que queda por explotar.

Los datos sobre la producción y recursos naturales son difíciles de obtener y en muchas ocasiones a los países no les interesa dar datos concretos. Así pues, los datos de los recursos minerales del aluminio y del titanio han sido obtenidos a partir de USGS (*United States Geological Survey*) [14], una organización que recopila información sobre depósitos y minas del mundo. En el caso del plástico y del petróleo, estos datos están aún más escondidos, de manera que se ha recopilado la información a partir de varias fuentes [27] [28] [41].

### 4.1. Recursos y reservas naturales

Aunque la cantidad de recursos naturales que hay en la corteza terrestre es enorme, solo una pequeña fracción con concentraciones elevadas de ciertos elementos abastece las necesidades actuales de la industria. Por esta razón hay que clasificarlos y diferenciarlos.

Según USGS los recursos minerales se organizan principalmente en recursos, reservas base y reservas. Estos recursos pueden clasificarse en identificados (demostrados o inferidos según su certidumbre) y no identificados (hipotéticos o especulativos en función del grado de ocurrencia más o menos cierta). A su vez, pueden ser económicos, marginalmente económicos o bien sub económicos [14], tal como se muestra en la Figura 4.1<sup>1</sup>. En el Anexo A se encuentran definidos cada uno de estos términos.

---

<sup>1</sup> Esta clasificación puede utilizarse también para el petróleo.



Cumulative Production	IDENTIFIED RESOURCES		UNDISCOVERED RESOURCES		
	Demonstrated		Inferred	Probability Range	
	Measured	Indicated		Hypothetical	(or)
ECONOMIC	Reserves		Inferred Reserves	+	
MARGINALLY ECONOMIC	Marginal Reserves		Inferred Marginal Reserves		
SUBECONOMIC	Demonstrated Subeconomic Resources		Inferred Subeconomic Resources		
Other Occurrences	Includes nonconventional and low-grade materials				

**Figura 4.1** Clasificación de los recursos naturales

Por tanto, la disponibilidad de un recurso viene definida por la existencia física de unos elementos cuyas características permitan la extracción, producción y utilización de manera económica mediante la tecnología disponible.

## 4.2. Métodos teóricos

Existen diferentes métodos y teorías para predecir y evaluar la disponibilidad y el agotamiento de los recursos naturales y de los materiales. Los resultados obtenidos son solo aproximaciones que indican la tendencia o el orden de magnitud del agotamiento. Dichos resultados podrían verse afectados por distintos factores económicos, geológicos, políticos o tecnológicos [42].

Uno de los métodos más simples es el cálculo del R/P o RPR. Este aproxima de una manera muy simple los años que restan para poder extraer un recurso natural, asumiendo un valor constante de producción y de reservas existentes en un año determinado. Por lo que es considerado un modelo estático (ver Figura 4.2.a).

$$R/P = \frac{\text{reservas conocidas [toneladas]}}{\text{producción} \left[ \frac{\text{toneladas}}{\text{año}} \right]} \quad (4.1)$$

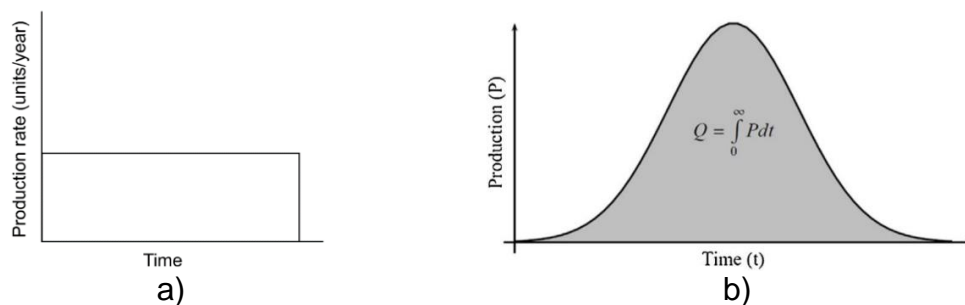
Sin embargo, esta aproximación es poco precisa ya que la producción tiende a aumentar exponencialmente con el tiempo. Además, la cantidad de reservas

varía continuamente debido a futuros descubrimientos, mejora en tecnología, etc.

Una alternativa más precisa es el método del pico de Hubbert, que permite obtener una curva de producción dinámica a través del tiempo teniendo en cuenta la producción actual y futura basada en los recursos mundiales disponibles. De manera que se puede estimar el pico de producción y el grado de agotamiento de los materiales y de sus recursos naturales.

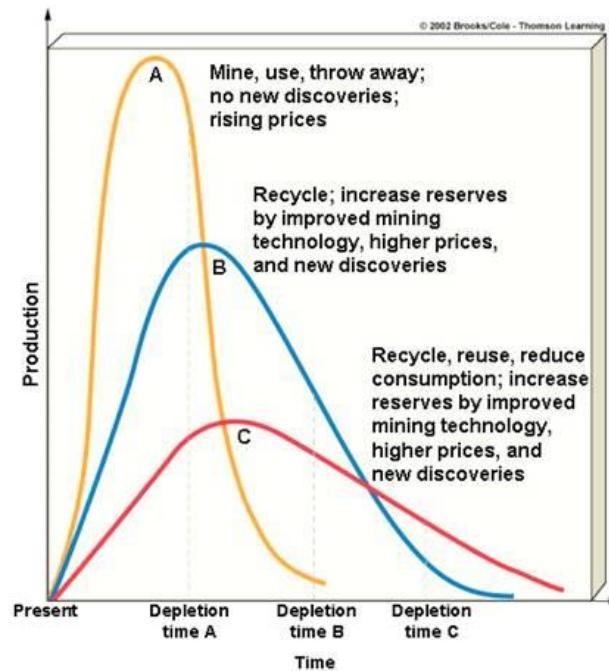
Las curvas obtenidas presentan una forma de campana, tal como se aprecia en la Figura 4.2.b. Crecen exponencialmente hasta alcanzar el punto de inflexión o pico de Hubbert, donde se alcanza la máxima calidad y accesibilidad en la extracción del recurso. A partir de ese punto la producción no puede satisfacer a la demanda, por lo que los precios se disparan y la producción empieza a disminuir hasta agotar físicamente el recurso. El área que queda por debajo de esta curva es la cantidad de recursos o reservas disponibles y conocidas.

Generalmente esta curva se representa en toneladas de producción en función del tiempo. Aunque para hacerlo de forma más precisa se puede expresar en términos de exergía (B) en función del tiempo, por lo que se tiene en cuenta no solo la cantidad del recurso sino también su calidad y composición (la calidad y concentración disminuye a medida que se explotan los yacimientos). Si además de esto, se tiene en cuenta la tecnología disponible actual para extraer y refinar los recursos, entonces la gráfica se calcula en costes de reemplazamiento de exergía (B\*). En el Anexo A se encuentran definidos cada uno de estos términos.



**Figura 4.2** Graficas de producción definidas por diferentes métodos: a) método del R/P, b) método de Hubbert

Hay múltiples factores que pueden modificar la curva: la fuente de los datos, aspectos medioambientales, políticos, geológicos, tecnológicos, económicos, etc. De tal manera que, la variación en los precios, el hallazgo de nuevos depósitos explotables, la implementación de nuevas leyes o el desarrollo de nueva tecnología podría hacer variar moderadamente la curva de agotamiento, tal como se representa en la Figura 4.3. Además, otros aspectos como el reciclaje no se tienen en cuenta a la hora de estimar el método de Hubbert. Por lo que esta aproximación no debe considerarse como definitiva, sino orientativa [43].



**Figura 4.3** Factores que afectan a la curva de agotamiento

Por último, con el cúmulo de producción de cada año se puede calcular el porcentaje de mineral o combustible fósil que se ha extraído respecto el total de reservas estimadas en la actualidad. Para ello se debe aplicar la siguiente ecuación:

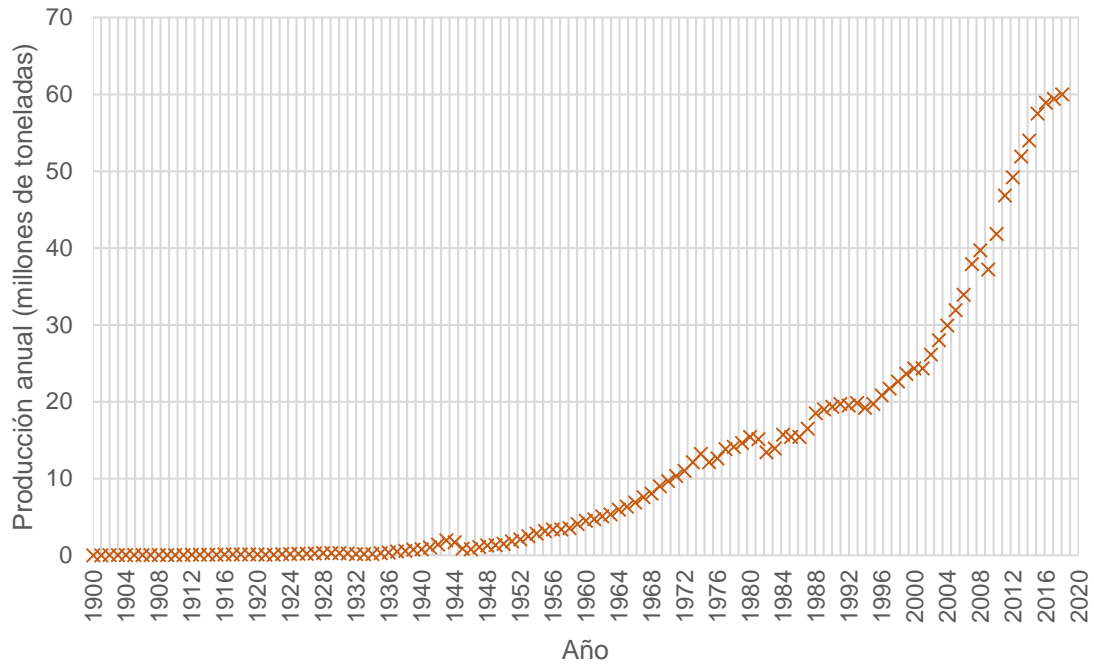
$$\text{Agotamiento (\%)} = \frac{\sum \text{producción [toneladas]}}{(\text{reservas conocidas} + \sum \text{producción}) [\text{toneladas}]} \quad (4.2)$$

### 4.3. Disponibilidad de los materiales

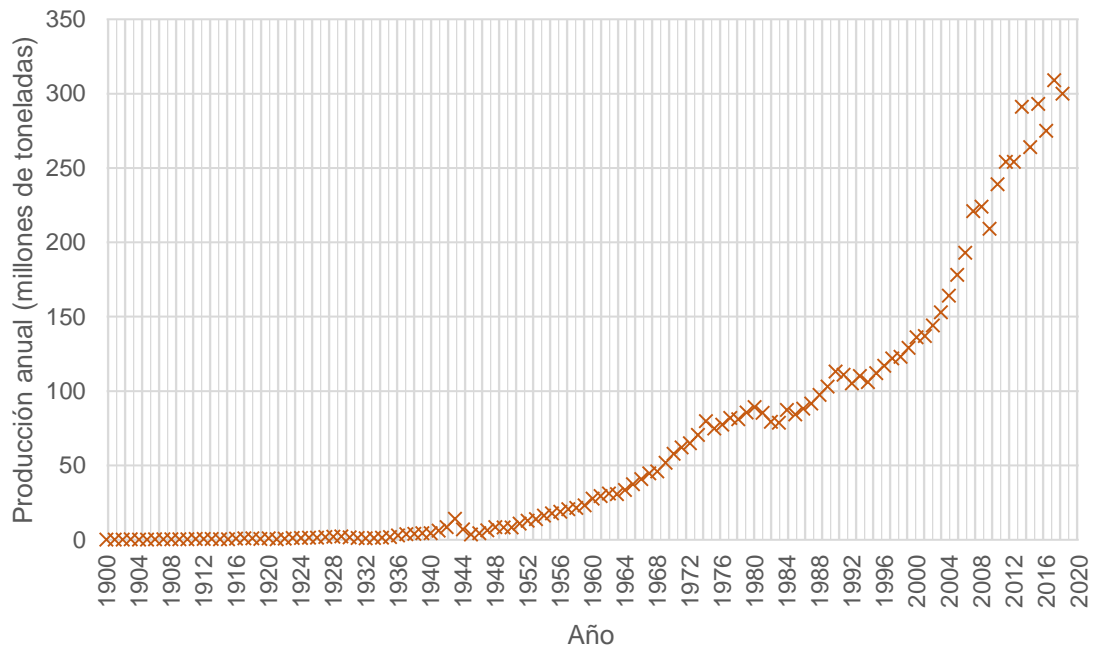
En los siguientes apartados se analiza la producción de cada material, así como sus recursos y reservas para poder evaluar la disponibilidad y el grado de agotamiento.

#### 4.3.1. Aluminio

La producción de aluminio se ha ido incrementando a lo largo de los años hasta alcanzar en 2018 los 60 millones de toneladas a nivel mundial (ver Figura 4.4), lo que conlleva que la producción de bauxita llegara a los 300 millones de toneladas ese mismo año (Figura 4.5).



**Figura 4.4** Producción mundial de aluminio (1900-2018)



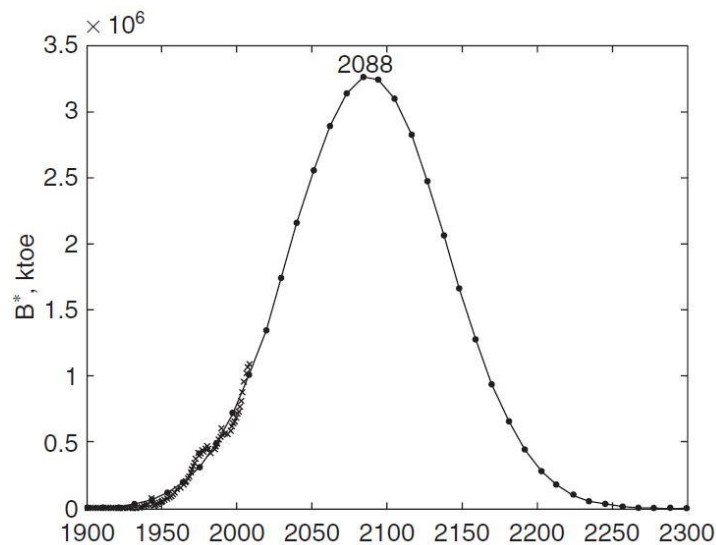
**Figura 4.5** Producción mundial de bauxita (1900-2018)

Desde los últimos años, este metal se ha extraído de forma masiva y se prevé que la producción siga aumentando debido al incremento en la demanda del metal por parte de la industria y la sociedad. Por consiguiente, se exigirá una mayor extracción de bauxita.

Actualmente se estima que los recursos globales de bauxita son de entre 55.000 y 75.000 millones de toneladas. El 32% de los recursos están en África, el 23% en Oceanía, el 21% en Sudamérica y el Caribe, el 18% en Asia y el 6% en las reservas restantes del mundo. Así mismo, las reservas de bauxita actuales están estimadas en 30.000 millones de toneladas.

Con estos datos se puede hacer una primera estimación de los años que quedan para el agotamiento de este mineral mediante el R/P. Con la ecuación (4.1) se obtiene un R/P de 100 años. Esto es, con las reservas conocidas hasta el momento y produciendo cada año la misma cantidad de bauxita que en 2018, el mineral se agotaría dentro de 100 años, es decir, en 2119. Sin embargo, esta estimación no tiene en cuenta factores como la variación en la producción de bauxita, el descubrimiento de nuevas reservas explotables, la calidad del mineral extraído, etc.

Por esto, en la siguiente imagen (Figura 4.6) se representa el pico de Hubbert aplicado a la producción de aluminio a partir de los recursos mundiales de bauxita estimados. Cabe destacar que la curva está calculada en términos de exergía, concretamente en  $B^*$ . De esta manera se puede evaluar de una manera más realista el grado de agotamiento del metal, obteniendo su pico de producción y año de agotamiento [42]. Las cruces que se observan en la gráfica representan la producción conocida de cada año y, la línea, la producción estimada.



**Figura 4.6** Pico de Hubbert del aluminio

Según este modelo, el pico de producción del aluminio se sitúa en el año 2088. A partir de ese momento, la producción empieza a disminuir hasta llegar al agotamiento del mineral, y por tanto del metal, aproximadamente sobre el año 2300.

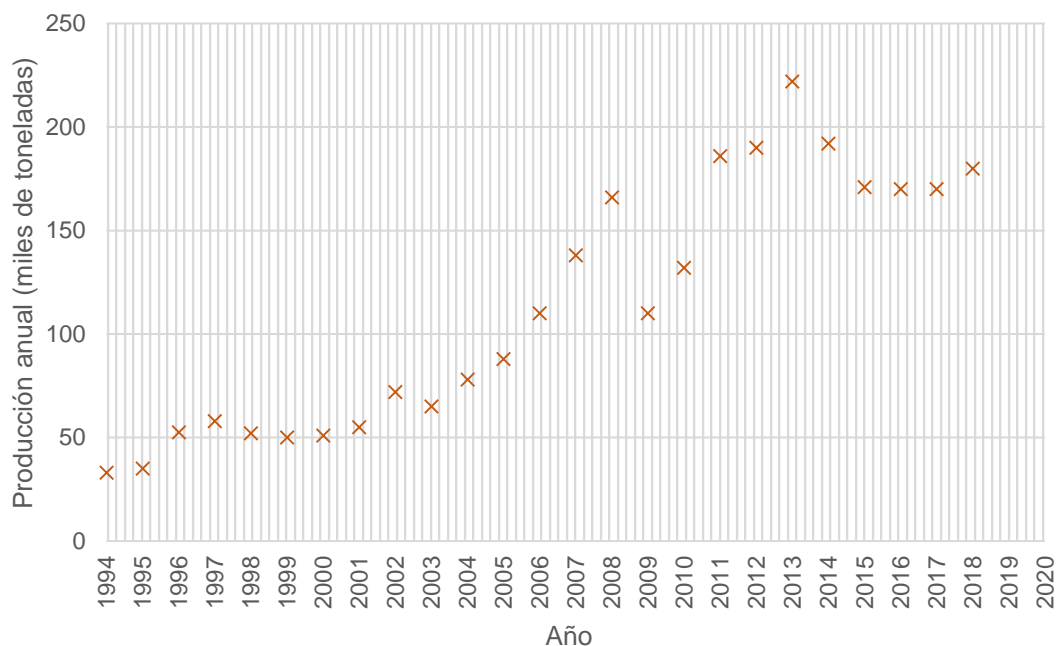
Sumando la producción de bauxita de cada año hasta la actualidad se obtiene un total de 7.655.299.000 toneladas extraídas. Para saber el porcentaje de agotamiento actual de bauxita se aplica la ecuación (4.2), y se obtiene un 20,33%.

Por tanto, a día de hoy se ha extraído el 20,33% de bauxita con respecto a las reservas conocidas, es decir, aún queda el 79,67% de bauxita para explotar en el planeta (todo ello sin tener en cuenta una futura reorganización de las reservas).

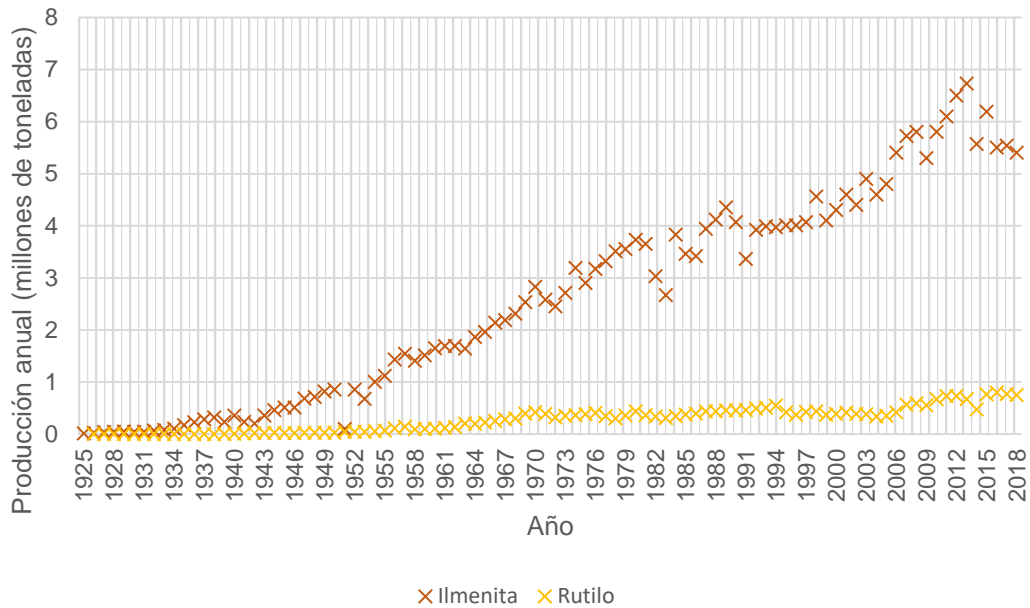
Con estos datos se puede concluir que el aluminio es uno de los elementos menos agotados del planeta. No obstante, la producción sigue aumentando cada año y, de momento, las reservas conocidas se mantienen constantes desde hace varios años. De manera que es posible que el grado de agotamiento aumente cada vez de manera más rápida.

#### 4.3.2. Titanio

La producción de titanio sigue creciendo principalmente por su uso en la industria aeroespacial, en la cual se destina el 80% de la producción de este metal [14]. En 2018 la producción de titanio esponja fue de 180.000 toneladas (ver Figura 4.7), mientras que la de rutilo e ilmenita fue de 750.000 y 5.400.000 toneladas respectivamente. En la Figura 4.8 se representa el gráfico de producción de los minerales del titanio.



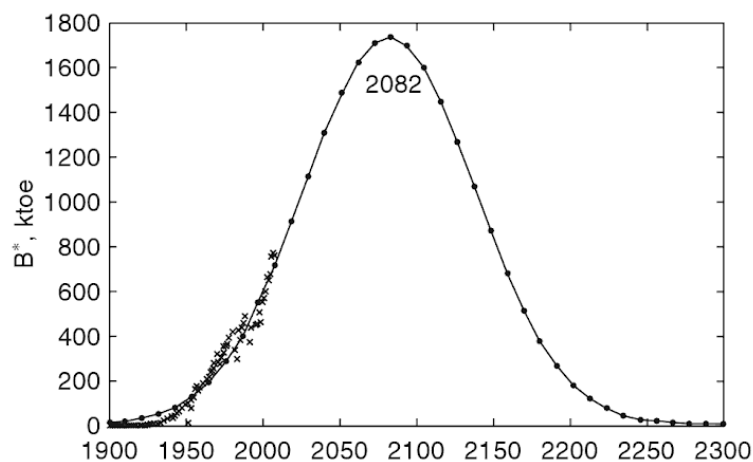
**Figura 4.7** Producción mundial de titanio esponja (1994-2018)



**Figura 4.8** Producción mundial de los minerales del titanio (1925-2018)

Se estima que los recursos globales de rutilo, ilmenita y anatasa son más de 2.000 millones de toneladas. Las reservas mundiales de rutilo son de 62 millones de toneladas, y las de ilmenita de 880 millones. Por tanto, los principales minerales del titanio tienen unas reservas mundiales de 942 millones de toneladas. A continuación, se calcula el R/P de cada mineral aplicando la ecuación (4.1) y se obtienen 82 años para el rutilo y 162 para la ilmenita. Así pues, el rutilo se agotaría en el 2101 y la ilmenita en 2181.

En este caso se representa el pico de Hubbert del titanio de acuerdo con los recursos de ilmenita estimados (Figura 4.9), ya que estos suponen el 89% de la producción del metal y por lo tanto son de mayor interés [42].



**Figura 4.9** Pico de Hubbert del titanio (ilmenita)

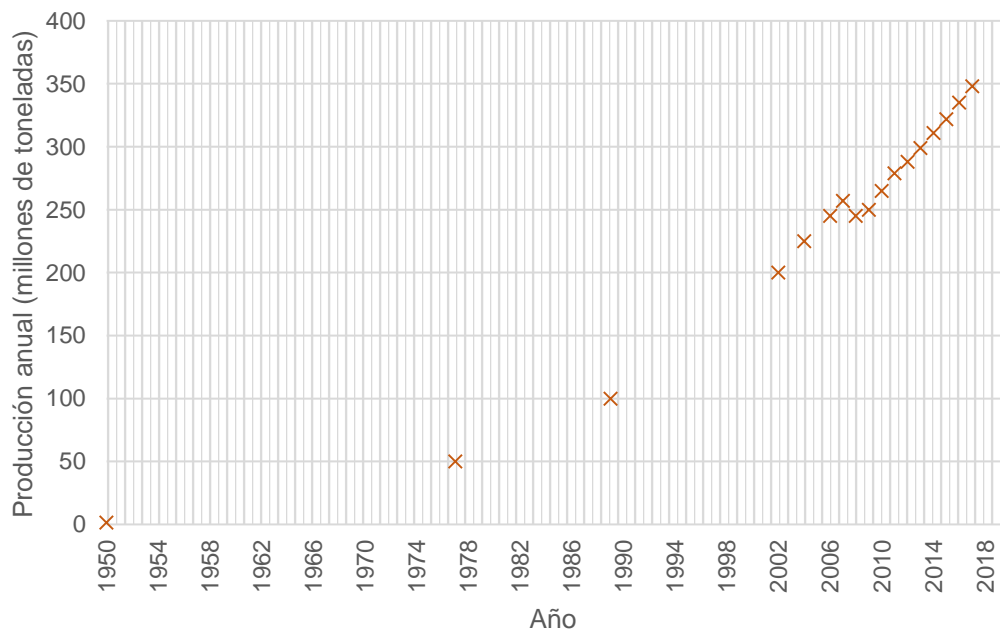
El titanio (ilmenita) alcanza su pico de producción en el 2082, y su agotamiento está evaluado sobre el año 2300. Por otro lado, aunque no se representa la gráfica del titanio procedente del rutilo, los estudios demuestran que su pico está situado en el año 2069 [42].

La producción acumulada de rutilo es de 25.815.788 toneladas, y la de ilmenita de 246.354.600 toneladas. Aplicando la ecuación (4.2) se obtiene un agotamiento del 29,39% de rutilo y un 21,87% de ilmenita.

Los recursos del titanio no son tan abundantes como en el caso de la Bauxita. Sin embargo, en general el volumen de producción de titanio es bajo respecto a otros materiales, y una de las causas puede ser el alto coste en el proceso de producción (método de Kroll). Así que estos factores se compensan y hacen que el titanio sea también un elemento abundante actualmente en el planeta.

#### 4.3.3. Materiales compuestos de matriz orgánica (plástico)

La producción de plástico como derivado del petróleo también sigue aumentando con el paso del tiempo, tal como se muestra en la Figura 4.10 y Figura 4.11, respectivamente. En 2017 se llegaron a producir 348 millones de toneladas de plástico, y 4.387,1 millones de toneladas (92.649.000 barriles por día) de petróleo en todo el mundo.



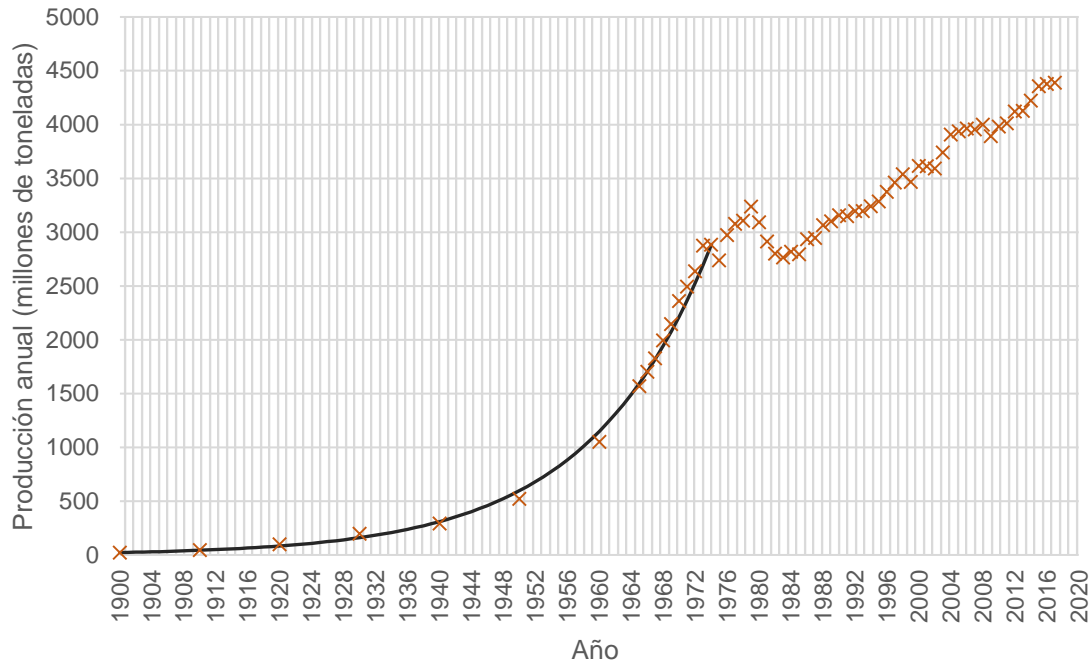
**Figura 4.10** Producción mundial de plástico (1950-2017)

Debido a la falta de datos de producción de petróleo, se ha realizado una aproximación de la producción anual desde 1900 hasta 1964. Tal como se ha



visto anteriormente, durante los primeros años de producción de los recursos la curva siempre presenta una forma exponencial, de manera que la aproximación se ha realizado mediante una función exponencial.

La función utilizada para tal fin es  $y(t)=1,763E-53 \cdot \exp(0,06557x)$ , donde 'y' corresponde a la producción y 'x' al año específico.



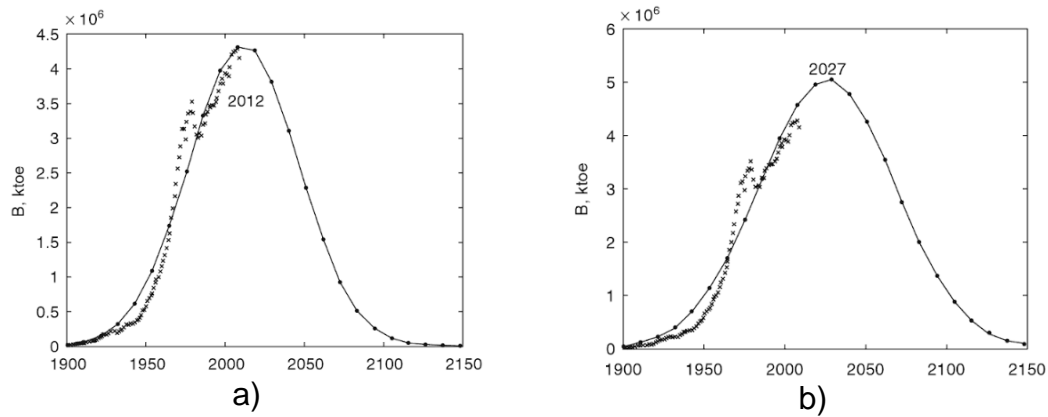
**Figura 4.11** Producción mundial de petróleo (1900-2017)

La línea continua corresponde a la aproximación realizada, mientras que las cruces representan la producción real de cada año. Resulta curioso ver que hasta aproximadamente el año 1979 la producción ha crecido de forma exponencial, pero luego ha cambiado y ha seguido creciendo de forma lineal hasta la actualidad.

Se estima que los recursos globales de petróleo son de unos 447.874 millones de toneladas [44], mientras que las reservas son de unos 239.300 millones de toneladas (1.696.600.000.000 barriles). El 47,6% de estas reservas están localizadas en Oriente Medio, el 19,5% en Sur y Centroamérica, el 13,3% en Norteamérica, el 8,5% en los países del CIS (Arabia Saudí, Irán e Iraq, entre otros), el 7,5% en África, el 2,8% en Asia y el 0,8% en Europa [28].

Con estos datos y aplicando la fórmula (4.1) se obtiene un R/P de 54 años. Por lo que en 2071 se acabarían las reservas de petróleo si la producción se mantuviera igual que en 2017.

A continuación, se representa el pico de Hubbert aplicado al petróleo (Figura 4.12) en unidades de exergía (B) [42].



**Figura 4.12** Pico de Hubbert del petróleo: a) basado en reservas demostradas, b) basado en recursos

En el caso a) el pico se alcanzó en 2012, por lo que la producción de petróleo ya estaría en decadencia. Sin embargo, considerando todos los recursos de petróleo del planeta el pico se alcanza en el 2027. En ambos casos, el año de agotamiento se sitúa sobre el 2150-2200. La producción acumulada de petróleo es de 194.896,5 millones de toneladas. Ahora, aplicando la ecuación (4.2) se obtiene un agotamiento de petróleo del 44,89%.

Con los datos obtenidos se puede concluir que ya casi se ha agotado la mitad del petróleo disponible en la Tierra, y esto se ve reflejado en varios aspectos. Por un lado, el pico de producción ya se ha alcanzado en algunos países y, por otro lado, desde los últimos años la producción global de este combustible fósil crece de manera lineal.

#### 4.4. Resumen y conclusiones

En la Tabla 4.1 se resume todos los resultados de cada uno de los materiales.

Recurso	Reservas mundiales [millones de toneladas]	Recursos mundiales [millones de toneladas]	Producción acumulada [millones de toneladas]	R/P [año]	Pico de producción [año]	Agotamiento [año]	Porcentaje de agotamiento [%]
Aluminio (bauxita)	30.000	55.000-75.000	7.655	100	2088	2300	20,33
Titanio (ilmenita)	880	2.000	246	162	2082	2300	21,87
Titanio (rutilo)	62	Incluido en ilmenita	26	82	2069	-	29,39
RP (petróleo)	239.300	448.000	194.896	54	2027	2200	44,89

**Tabla 4.1** Disponibilidad de los materiales y sus recursos en la Tierra

Los resultados obtenidos demuestran que en tan solo 100 años los recursos del planeta han sido extraídos de forma masiva. La tendencia observada demuestra que la producción continuará aumentando a lo largo de los años, principalmente debido al aumento de población que tiene acceso a recursos y al desarrollo de nueva tecnología e infraestructuras. Por lo que se exigirá una mayor demanda de materiales.

Aunque actualmente los recursos del aluminio y del titanio no parecen tener problemas de escasez, sus picos están situados a lo largo del siglo XXI. Por lo que, en realidad, tampoco quedan demasiados años de margen para empezar a tomar medidas ante este posible problema.

Por otro lado, el petróleo sí que está empezando a presentar problemas de escasez dado que, hasta la fecha, se ha extraído casi la mitad de este recurso, por lo que en algunos países ya se habría alcanzado el pico de producción. En este caso, el margen para empezar a actuar y a buscar alternativas es mucho más pequeño, ya que su pico global se sitúa hacia el 2027.

Aunque se ha hecho una estimación del año en que se agotarían los recursos, los problemas podrían empezar a presentarse una vez se haya alcanzado el pico. Esto es debido a que, en general, si la producción no puede satisfacer al aumento de demanda, entonces los precios se disparan. Lo que supondría un colapso a la hora de adquirir materiales para satisfacer a la industria y a la sociedad. Además, llegar al pico significa que se ha gastado la parte más fácil de extraer, la que tiene mejor calidad y la que está más cercana a la superficie. Remover bosques, selvas, océanos y demás paisajes naturales para encontrar las últimas toneladas de recursos naturales no es la solución más adecuada para el planeta en el que vivimos. La disminución en la calidad del recurso o la dificultad para extraerlo puede provocar un mayor impacto ambiental ya que, si disminuye la calidad o hay más dificultad para extraer el recurso, entonces se necesita más energía para extraerlo y tratarlo. De manera que se genera más contaminación y residuos al medioambiente [36].

Se podría pensar que con el reciclaje se podría cerrar el ciclo de vida de los materiales, de manera que no se necesitaría producir nuevo material. No obstante, esta idea no es posible por distintas razones: el aumento de la población, la mejora de su nivel de vida y el desarrollo de nuevas tecnologías. De manera que, hasta que los países menos desarrollados no alcancen un nivel de vida similar al de los países desarrollados, seguirá aumentando la demanda de recursos naturales [45]. Además, el reciclaje de los materiales estudiados en este proyecto no es cien por cien efectivo ya que en algunas ocasiones se va perdiendo parte del material durante su ciclo de vida, por lo que nunca se cierra el ciclo por completo.

A pesar de esto, el reciclaje es una buena herramienta que ayuda a disminuir la extracción de recursos naturales y los distintos problemas relacionados con el medio ambiente y con la ética de las personas. Es por lo que la sociedad ha de intentar desarrollarse de manera inteligente, con eficiencia, reduciendo el consumo de materias primas y de energía, fomentando el reciclaje y respetando el medioambiente y el planeta.

## **CAPÍTULO 5. Explotación de los recursos en el espacio**

Como se ha comentado anteriormente, los minerales y demás recursos naturales siguen siendo vitales para satisfacer las necesidades básicas del ser humano y para el desarrollo de la sociedad y de la economía.

Gran parte de estos recursos naturales se obtienen en países subdesarrollados, de manera que su explotación no siempre se gestiona de la manera más adecuada, y acaba causando daños medioambientales y sociales. En general, la explotación del aluminio, el titanio y los RP conlleva problemas medioambientales tales como la deforestación, la pérdida de vegetación y de fauna, la contaminación y la generación de residuos, entre otros, además de los problemas sociales y de salud en poblaciones cercanas a los lugares de explotación.

La producción y demanda de los recursos depende básicamente de la población y de su nivel de vida, así como del desarrollo tecnológico y económico. Los materiales estudiados en este proyecto alcanzarán su pico de producción a lo largo del siglo XXI. A partir de ese momento se podrían empezar a presentar los primeros problemas debido a la subida en los precios de los materiales.

En este capítulo se analiza una de las posibles alternativas ante la crítica situación medioambiental y social que supone la explotación de los recursos naturales en la Tierra, así como para intentar posponer el pico de producción de los materiales y los problemas que ello conlleva. Esta alternativa consiste en buscar y explotar los recursos en cuerpos extraterrestres, ya sean satélites, asteroides o planetas. Para ello, hay que conocer los límites que establece la tecnología espacial en la actualidad y tener en cuenta la futura tecnología que podría desarrollarse. Debido a que el petróleo es un elemento que se ha formado en la Tierra a lo largo de los años a partir de materia orgánica, resulta difícil encontrarlo como tal en el espacio. No obstante, los plásticos podrían fabricarse mediante distintas reacciones químicas a partir de carbono e hidrógeno. De manera que este capítulo se centra principalmente en los recursos del aluminio y del titanio.

### **5.1. Cuerpos extraterrestres**

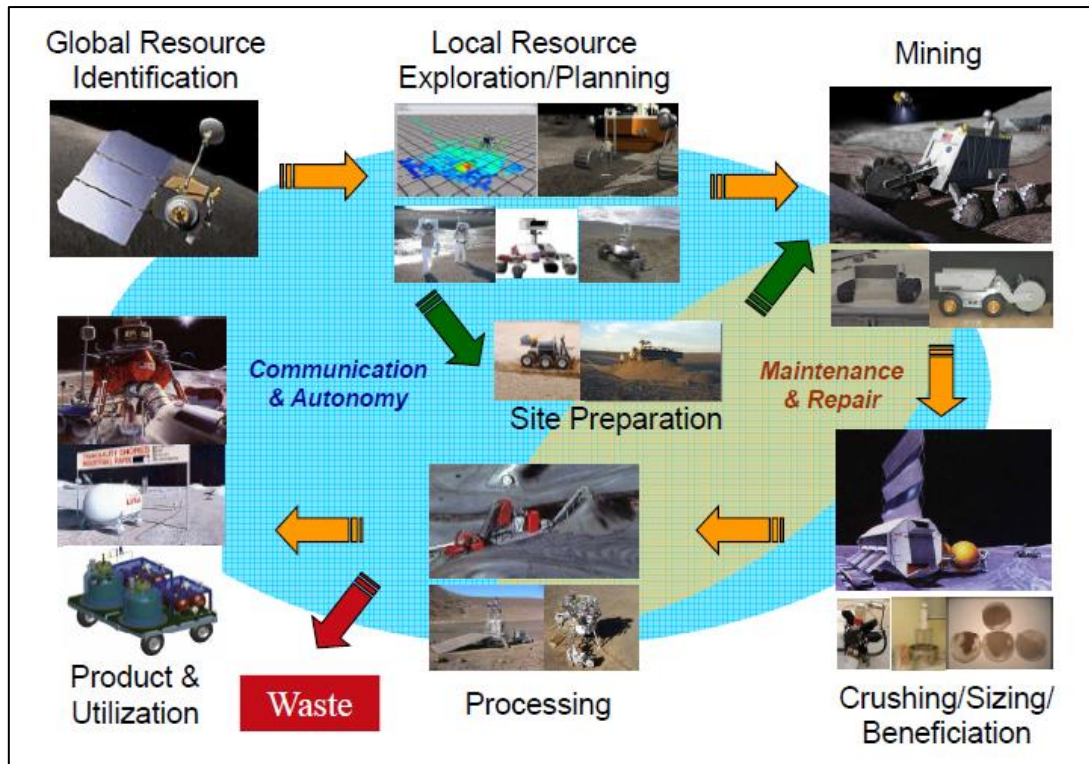
A continuación, se analiza la composición química y la posibilidad de explotar diferentes cuerpos en el espacio: satélites, asteroides y planetas.

#### **5.1.1. Satélites**

La Luna parece ser uno de los principales objetivos de explotación de recursos espaciales. El ser humano ha mostrado siempre un enorme interés por ella,

básicamente por ser el satélite natural de la Tierra y el cuerpo celeste más próximo al planeta, situado a unos 400.000 km, equivalente a 0,0026 AU (*Astronomical Units*).

Para poder analizar la explotación de los recursos lunares, es imprescindible definir y dejar constancia de las diferentes etapas necesarias para poder llevar a cabo tal misión (ver Figura 5.1). Estas etapas incluyen la identificación de los recursos, la exploración, el proceso de extracción, beneficiación y producción, y por último la utilización [46].



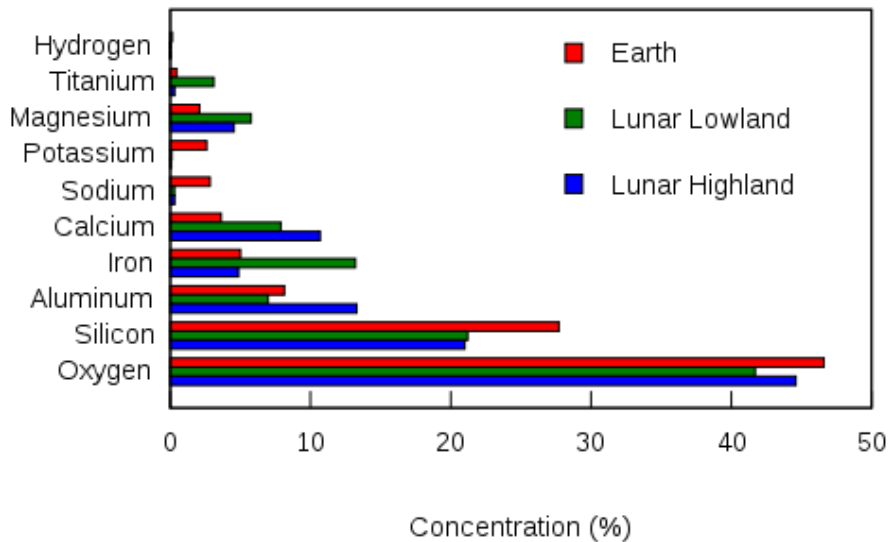
**Figura 5.1** Ciclo de explotación de los recursos espaciales

Cabe destacar que este esquema es extrapolable para la explotación de recursos en otros cuerpos del espacio, aunque puede variar ligeramente.

Gracias a diferentes muestras recogidas y analizadas y a diferentes misiones de exploración realizadas a lo largo de los años, se puede conocer un poco más sobre la geología y los recursos disponibles de la Luna.

La superficie del satélite está formada principalmente por regolito lunar: polvo, rocas, fragmentos de minerales y partículas vidriosas formadas por innumerables impactos de meteoritos. Debajo del regolito está el megaregolito, una región de roca fracturada. En la superficie se puede diferenciar las zonas claras de la luna (que se conocen como tierras altas o *highlands*) y las zonas oscuras (que son los mares, tierras bajas o *lowlands*) [47]. La composición química del satélite es muy similar a la de la tierra, aunque varía dependiendo

de la localización (tierras altas o mares). En la Figura 5.2 se representa la composición de la Luna en cada una de sus zonas y la comparación con la Tierra [48].



**Figura 5.2** Composición química de la Luna (% en peso)

Las rocas existentes en el satélite se pueden clasificar según se encuentren en tierras altas o en mares. La clasificación de las rocas en los mares depende, a su vez, de la concentración de  $\text{TiO}_2$ .

En estas rocas, los principales minerales existentes son los minerales de plagioclasa, piroxeno, olivino e ilmenita.

En la Figura 5.3 se representa la clasificación de las principales rocas y minerales que se encuentran en la Luna [49].

	Plagioclase	Pyroxene	Olivine	Ilmenite
<b>Highland rocks</b>				
Anorthosite	90%	5%	5%	0%
Norite	60%	35%	5%	0%
Troctolite	60%	5%	35%	0%
<b>Mare basalts</b>				
High-titanium	30%	54%	3%	18%
Low-titanium	30%	60%	5%	5%
Very-low titanium	35%	55%	8%	2%

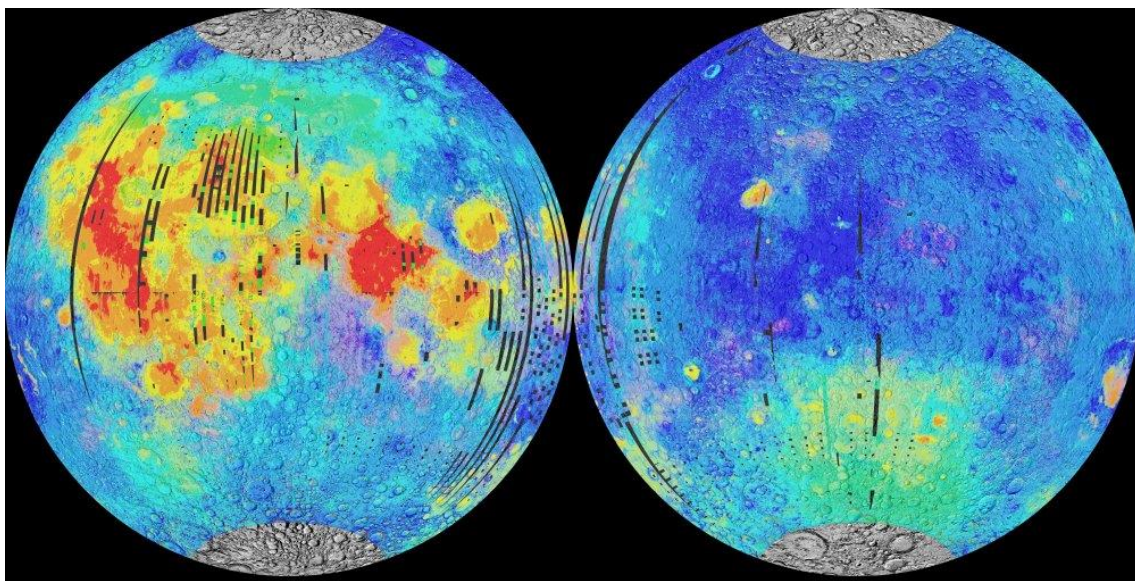
**Figura 5.3** Clasificación de las rocas y minerales de la Luna

El aluminio se puede encontrar principalmente en los minerales de plagioclasa: albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) y anortita ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ). También en otros silicatos como el



piroxeno. Por otro lado, el titanio se puede hallar en el mineral de óxido más abundante de la Luna, la ilmenita. Pero también en el rutilo, aunque en pequeñas cantidades, y en silicatos como el piroxeno [50].

La cantidad de aluminio y de titanio que hay es bastante significativa, y prueba de ello es la Figura 5.4. La parte coloreada en rojo-naranja-amarillo muestra la cantidad de titanio (de más a menos concentración) que existe sobre la superficie lunar. Estos colores predominan en los mares de la cara visible (mapa de la izquierda). Los tonos en azul corresponden a la cantidad de aluminio que se encuentra en anortosita (el tono más fuerte indica más cantidad de aluminio, y el tono más claro menos cantidad). Estos colores predominan en las tierras altas en ambas caras de la Luna. El verde corresponde a la concentración de hierro [51].

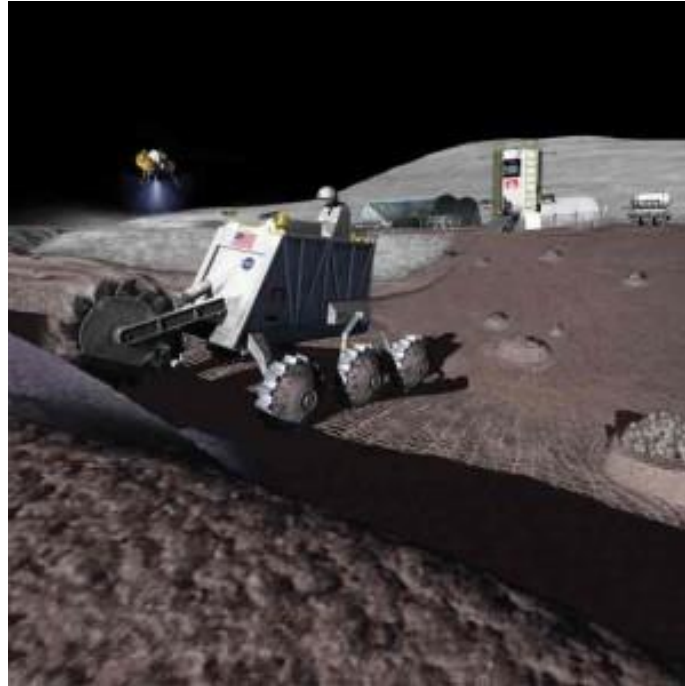


**Figura 5.4** Concentración de aluminio y titanio en la Luna

A pesar de que este proyecto se centra en el aluminio, el titanio y los materiales compuestos orgánicos, la Luna ofrece otros recursos de enorme interés como agua helada (se encuentra en los polos) y demás elementos como hierro, silicio, tierras raras, etc. Además, en este cuerpo se pueden obtener otros recursos muy importantes como helio-3 ( $\text{He-3}$ ), procedente del viento solar que ha llegado a la superficie debido a la ausencia de atmósfera.

Actualmente los elementos que despiertan un mayor interés son aquellos que permitirían sustentar la vida humana en la Luna. Por ejemplo, el agua y el oxígeno serían indispensables para vivir. Además, del agua también se podría obtener oxígeno e hidrógeno para utilizarlo como combustible para cohetes. Otro ejemplo, el  $\text{He-3}$ , que podría ser otra de las fuentes de energía, además de la luz solar. Los demás recursos, como por ejemplo los metales, se podrían emplear como materiales de construcción.

En vista de la cantidad de recursos explotables, el siguiente paso sería proceder a la localización exacta y extracción de estos recursos. Este proceso de extracción puede compararse con el de una mina a cielo abierto. Para ello, lo ideal sería utilizar maquinaria automatizada como *rovers*, robots, etc (ver Figura 5.5). También podría requerirse la presencia humana para explotar los recursos o bien para realizar todas las tareas de mantenimiento, operación, etc.



**Figura 5.5** Ilustración de un robot minando la Luna

Una vez extraído el regolito, la siguiente fase es la de beneficiación y producción de los metales. Para ello, sería necesario construir las plantas específicas en la superficie lunar.

Los métodos empleados para obtener los materiales a partir de los recursos lunares podrían ser diferentes a los de la Tierra. Sin embargo, es necesario realizar más investigación sobre el tema en cuestión. Para ello, habría que estudiar y evaluar la posibilidad de utilizar los mismos métodos que los empleados en la Tierra. En caso de no poder llevar a cabo estos métodos, se tendría que ver la posibilidad de adaptar los métodos ya existentes o bien buscar métodos alternativos para tal fin.

También existe la posibilidad de poder imprimir los productos finales mediante impresoras 3D a partir de regolito como material de entrada [52]. Esto podría servir, principalmente, para facilitar la construcción de una base lunar, además de poder fabricar otras piezas y componentes necesarios.

Con todo esto, en la Figura 5.6 se muestra una recreación de una explotación minera en la superficie lunar.





**Figura 5.6** Recreación de una explotación minera en la Luna

La explotación de los recursos en la Luna puede tener diferentes salidas o aplicaciones que deben irse implementando gradualmente, principalmente debido a su complejidad y coste económico [52]:

La idea principal es la conocida como ISRU (*In Situ Resource Utilization*), y consiste en explotar los recursos y utilizarlos allí mismo, por ejemplo, para poder continuar con la exploración del satélite. Así pues, esta idea permitiría seguir explorando y operando en cuerpos del sistema solar, minimizando los materiales transportados desde la Tierra y pudiendo desarrollar tecnología avanzada y automatizada para optimizar los beneficios disponibles que ofrece el espacio [53].

El concepto ISRU permitiría establecer una base en la superficie lunar. Se podría construir toda la infraestructura necesaria para fines científicos, turismo espacial, minería, etc, de manera que se necesitaría oxígeno, agua, comida, energía y combustible para sustentar la vida humana. De este modo, la forma más eficiente y económica de establecer una base en la Luna sería utilizar los recursos del propio satélite, además de llevar todo el material necesario desde la Tierra.

También existe la idea de trasladar parte de la industria espacial a la superficie lunar para poder llevar a cabo misiones tanto en el espacio *cislunar* como en otros sitios del sistema solar. Esta idea surge debido al alto coste que supone lanzar un cohete desde la Tierra. Y es que, la energía necesaria para escapar del campo gravitatorio de la Tierra es 22 veces mayor que la necesaria para escapar del de la Luna. Por esto, la solución sería lanzar los cohetes desde la superficie lunar, de tal manera que se podrían realizar misiones más sostenibles, más lejanas y durante más tiempo.

La última idea es la de explotar los recursos de la Luna y transportarlos a la Tierra. Esto podría ayudar en gran medida a la economía global del planeta, así como a la problemática medioambiental y social, y a la escasez de recursos. Para poder llegar a esto es necesario primero desarrollar el concepto ISRU, establecer una base lunar y toda la infraestructura necesaria para minar el satélite y trasladar parte de la industria espacial a la superficie lunar para poder lanzar cohetes con capacidad de almacenamiento suficiente como para transportar los materiales obtenidos a la Tierra.

Una cosa muy relevante que hay que destacar es que, en la Luna existen unas condiciones específicas que hay que tener en cuenta a la hora de diseñar y desarrollar toda la tecnología necesaria para explotar sus recursos. Algunos de estos factores son la poca gravedad, el vacío, los cambios extremos de temperatura, la radiación, etc. Además, estas condiciones podrían afectar directamente a la salud de las personas, por lo que se debería estudiar y evaluar el impacto que tiene sobre el ser humano vivir en el espacio.

Pero a pesar de las diferentes dificultades que pudieran surgir a la hora de explotar los recursos lunares, los ambientes en microgravedad permitirían un mejor control de los gases y los líquidos, el vacío facilitaría la obtención de materiales muy puros, y las temperaturas extremas podrían ser aprovechadas a la hora de obtener los materiales [54].

Así pues, los recursos de la Luna pueden proporcionar muchos elementos indispensables para la vida humana, materiales de construcción, energía y combustible. No obstante, es necesario realizar futuras investigaciones y exploraciones para conocer más sobre la Luna y sobre la posibilidad de explotar sus recursos. Por otra parte, es también imprescindible desarrollar toda la tecnología requerida para poder llevar a cabo tal misión.

Sin ir más lejos, la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) ya ha anunciado su regreso a la Luna en 2024 [55], y la ESA (*European Space Agency*) planea llevar en 2025 un robot para empezar a extraer y procesar el regolito para obtener agua, oxígeno, metales y He-3 [56]. Además, existen varias empresas privadas como Moon Express con la finalidad de explotar los recursos lunares de valor económico.

### 5.1.2. Asteroides

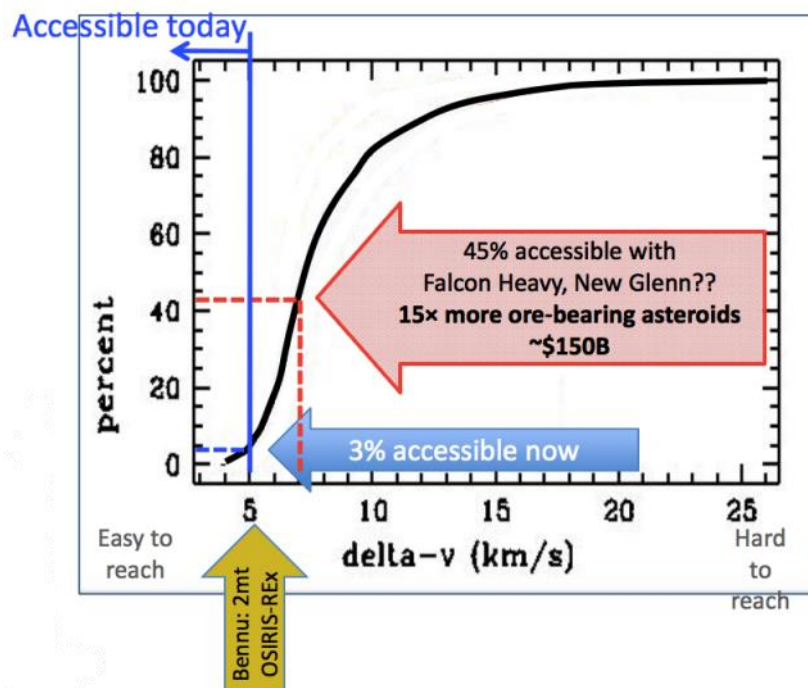
Los asteroides son también cuerpos de gran interés para la explotación de recursos en el espacio. Existe una inmensa cantidad de asteroides en el sistema solar, de diferentes tamaños (desde pocos metros hasta 1000 km) y formas.

La mayoría se encuentran localizados en el cinturón de asteroides entre Marte y Júpiter, aunque con la tecnología actual disponible sería inviable llegar a ellos y explotarlos. Sin embargo, existen unos asteroides conocidos como NEAs (*Near Earth Asteroid*) que parecen ser más accesibles, ya que están situados cerca de la Tierra, a una distancia de 1,3 AU o menos (lo que equivale a 194.477.231,91

km). Se calcula que hay unos 20.000 NEAs, aunque cada año se descubren más [54] [57].

Hay varios factores que sirven para estudiar la viabilidad de explotar un asteroide. Uno de ellos es la economía orbital, que indica el cambio de velocidad necesario (delta-V) de un cohete lanzado desde la Tierra para alcanzar la órbita de destino, y el tiempo de viaje. Los NEAs tienen incrementos de velocidad pequeños (por lo que se requiere una menor energía para cambiar de órbita) y están próximos a la órbita de la Tierra. Así pues, estos son los asteroides más viables para explotar.

Los avances tecnológicos permitirán cada vez acceder a un mayor número de asteroides. Un ejemplo de ello es el cohete más potente del mundo, llamado Falcon Heavy y fabricado por SpaceX, que permitiría acceder a asteroides con un delta-V mayor. En la Figura 5.7 se representa el porcentaje de asteroides de 100 metros de diámetro susceptibles a ser minados en función del parámetro delta-V [58].



**Figura 5.7** Porcentaje de asteroides accesibles en función de delta-V

Otro de los factores a tener en cuenta para explotar los recursos de los asteroides es la composición química. Los asteroides son rocosos, y se clasifican principalmente según su composición de la siguiente manera [59]:

- Tipo C: Compuestos principalmente por carbono y agua. El 75 % de los asteroides del sistema solar son de este tipo.
- Tipo S: Compuestos principalmente por silicatos de hierro, magnesio, aluminio, etc, y otros metales como níquel. Engloban aproximadamente el 17% de los asteroides.

- Tipo M: Compuestos principalmente por metales tales como hierro y níquel, además de otros metales preciosos.

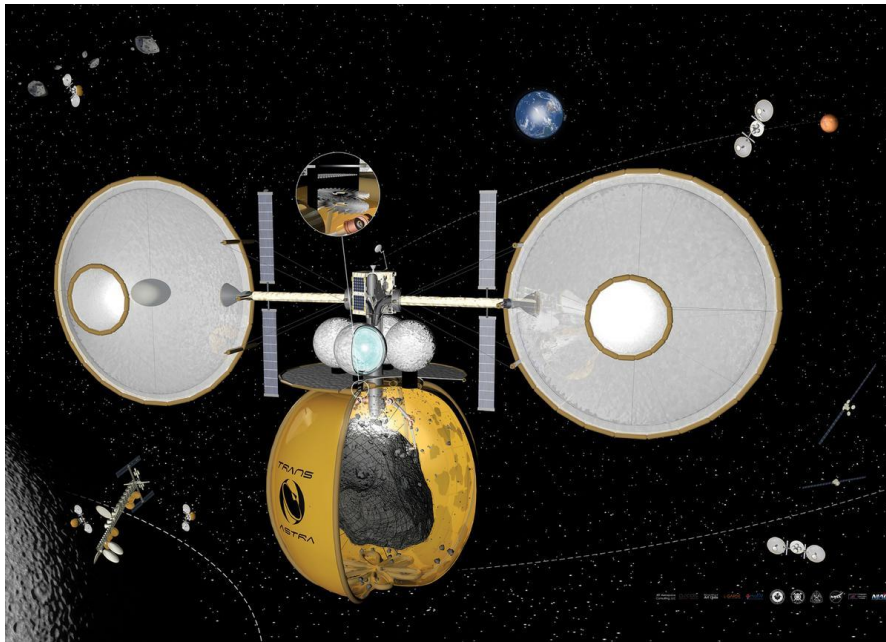
Es importante destacar que la composición de los asteroides depende de la distancia a la que se encuentran del sol, y puede variar significativamente en cada asteroide. En general, los elementos volátiles más comunes en asteroides son el hidrógeno, el carbono, el nitrógeno y el oxígeno. En cuanto a metales, destacan el hierro, el níquel y el cobre. En estos cuerpos también se encuentran PGM (*Platinum Group Metals*), que son metales muy caros y difíciles de encontrar en la Tierra. Los más frecuentes en los asteroides son el rutenio, rodio, paladio, osmio, iridio y platino. También puede encontrarse aluminio en algunos asteroides, aunque en cantidades más reducidas. Por otra parte, el titanio no es un elemento demasiado común en los asteroides, aunque también podría hallarse en alguno de ellos.

Las diferentes etapas que constituyen la explotación de recursos en asteroides son, en general: identificación de los asteroides, exploración y recogida de muestras, extracción, producción y transporte.

Existe en internet una base de datos llamada Asterank donde se ha recopilado información de cerca de 600.000 asteroides y se ha estimado el potencial para explotarlos (teniendo en cuenta factores como el valor económico, el coste de explotación, accesibilidad, etc) [60]. Según Asterank, los asteroides Anteros y 2001 CC21 son ricos en aluminio, y son dos de los asteroides con mayor potencial para explotar.

Hay dos formas de minar o extraer los recursos de un asteroide, y depende de las medidas del cuerpo usar un método u otro [61]:

- Asteroides pequeños: Una manera de explotar los recursos sería capturar el asteroide, extraer los recursos in situ y transportarlos de vuelta a la Tierra. Para ello se necesitarían sondas con la tecnología necesaria para capturar el asteroide, extraer los recursos allí mismo y almacenarlos. Si el asteroide tuviera recursos suficientes como agua, estos podrían utilizarse como combustible para volver a la Tierra. En la Figura 5.8 se muestra la representación de una explotación in situ de un asteroide capturado. Otra forma de explotar los recursos sería capturar el asteroide, transportarlo a una órbita alrededor de la Luna e impactarlo sobre la superficie lunar. En este caso, sería necesario que estuviera montada en la Luna toda la infraestructura necesaria para poder explotar los recursos del asteroide.
- Asteroides grandes: En este caso, podrían anclarse las sondas y toda la maquinaria necesaria en la superficie del cuerpo para extraer los recursos y transportarlos a la Tierra. No obstante, tanto la fase de anclaje como la de extracción serían bastante complicadas debido a la escasa gravedad de los asteroides y a su movimiento de rotación. Al igual que antes, los recursos de agua podrían utilizarse como combustible para llevar de vuelta los recursos explotados, reduciendo de esta manera los costes de la misión.



**Figura 5.8** Recreación de una explotación in situ de un asteroide pequeño capturado

Actualmente hay varias empresas privadas con el objetivo de minar asteroides, como Planetary Resources, Asteroid Mining Corporation, Aten Engineering, TransAstra Corporation, etc.

Y es que el ser humano ya ha conseguido aterrizar sondas en algunos asteroides para recoger muestras y traerlas de vuelta a la Tierra. En 2010, la sonda japonesa Hayabusa consiguió traer de vuelta a la Tierra muestras del asteroide Itokawa, y el pasado febrero de 2019 la sonda Hayabusa 2 consiguió de nuevo aterrizar unos instantes sobre el asteroide Ryugu para el mismo propósito [62]. Además, en 2016 la NASA lanzó la misión OSIRIS-REx para traer 2 kg de material del asteroide Bennu [63].

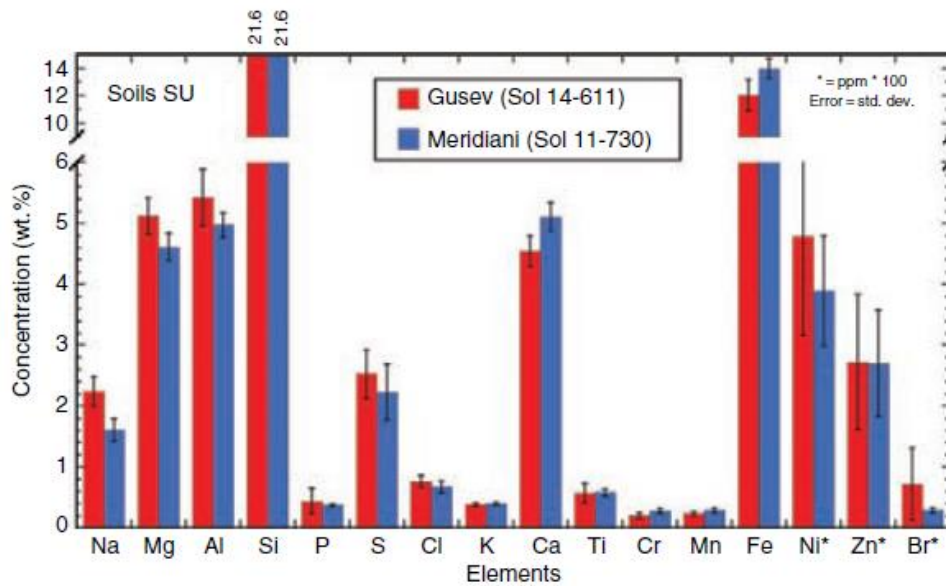
Aunque en estas misiones tan solo se ha conseguido traer de vuelta pequeñas cantidades de material, son de gran importancia e imprescindibles para poder seguir explorando el cosmos y conseguir en un futuro que la sociedad se beneficie de los recursos que proporciona el espacio.

### 5.1.3. Planetas

Marte es uno de los planetas más próximos a la Tierra y de mayor interés para el hombre. Gracias a diferentes misiones de exploración realizadas mediante sondas en órbita y *rovers* en la superficie, y a los meteoritos provenientes de Marte que han llegado a la Tierra, se puede conocer más sobre la composición del planeta. Sin embargo, estos conocimientos son aún bastante limitados, por lo que es necesario seguir explorando. Además, se está estudiando la posibilidad de enviar a los primeros seres humanos al planeta para colonizarlo.

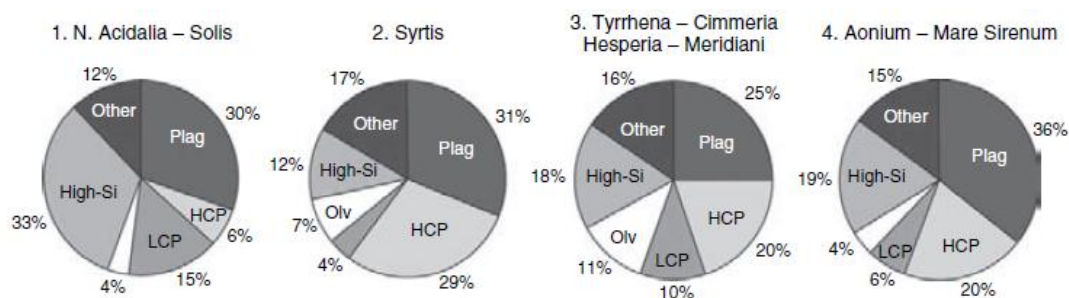
Marte es un planeta rocoso. La mayor parte de su superficie está cubierta por un polvo muy fino y rojizo (regolito) debido a la gran cantidad de óxido de hierro que existe. Su atmosfera está compuesta principalmente por dióxido de carbono, argón y nitrógeno [64]. Aunque existen varios indicios de haberse encontrado agua en el planeta, su abundancia aún no está del todo clara.

En la Figura 5.9 se representa la composición del suelo marciano estimada a partir de las muestras recogidas en dos zonas concretas: el cráter Gusev y la llanura Meridiani Planum. Cabe destacar que las concentraciones de níquel, zinc y bromo están representadas en PPM (*Parts Per Million*) [65].



**Figura 5.9** Composición química del suelo de Marte

En general, los minerales más comunes de Marte son el olivino (Olv), el piroxeno (LCP o HCP según contenga menor o mayor cantidad de calcio), los feldespatos como la plagioclasa (Plag) y los silicatos (High-Si), tal como se muestra en la Figura 5.10 [66]. También se pueden encontrar otros minerales como titanomagnetita e ilmenita, minerales carbonatos, sulfatos, cloruros, etc [67].

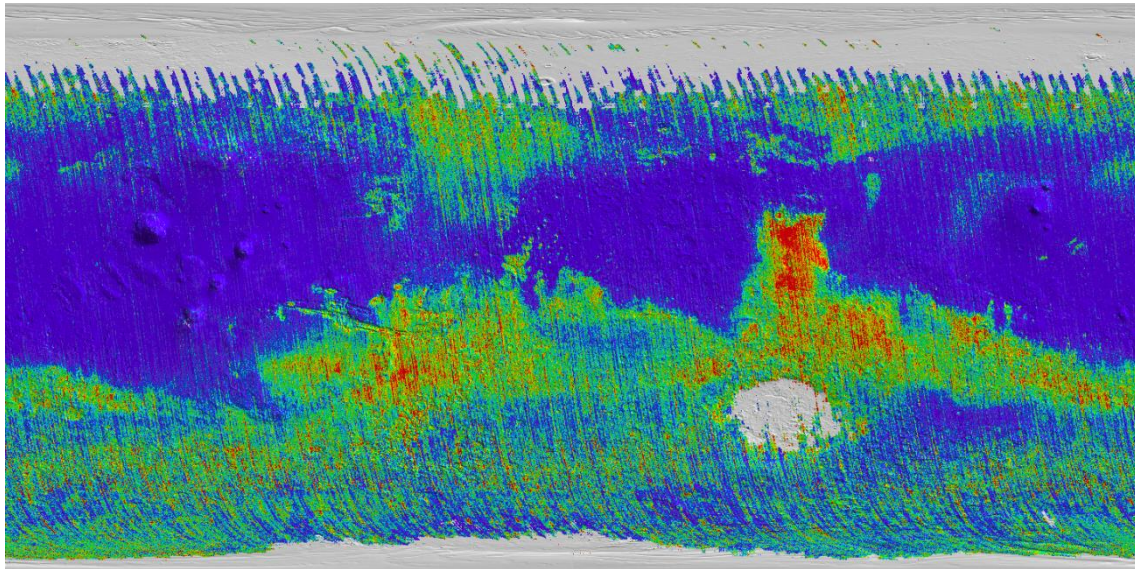


**Figura 5.10** Clasificación y abundancia de los minerales en Marte



En este caso, el aluminio se podría obtener de la plagioclasa y de otros aluminosilicatos, y el titanio de la titanomagnetita o de la ilmenita. Además, en el planeta se puede encontrar carbono e hidrógeno, elementos necesarios para poder realizar diferentes reacciones químicas para fabricar plástico.

Al igual que en la Tierra y en la Luna, en Marte también existen concentraciones bastante importantes de aluminio. Prueba de ello es la Figura 5.11, donde se observa el mapa de concentración mineral de plagioclasa detectado en la superficie de Marte. Los tonos verdes indican concentraciones bajas de mineral y los tonos rojos concentraciones más abundantes [68]. Por otro lado, el titanio se encuentra en cantidades más reducidas.



**Figura 5.11** Concentración de plagioclasa en Marte

Marte ofrece otros recursos de gran interés como dióxido de carbono y agua, que pueden proporcionar combustible y oxígeno, entre otros, para sustentar la vida humana. También otros elementos como hierro, silicio, magnesio, calcio y sodio. Además, en este planeta se puede obtener energía a partir de la luz solar y el viento solar [69].

Y es que, actualmente, gran parte del desarrollo de tecnología espacial se orienta hacia la colonización de Marte. Por esto, sería necesario establecer una base habitable autosuficiente, y por ello, desarrollar las bases del concepto ISRU.

Tal como se ha visto anteriormente, primero se deberían localizar los recursos, luego extraerlos con robots y *rovers*, seguidamente realizar el proceso de beneficiación y obtención de los materiales, y por último fabricar los productos finales mediante impresión 3D u otras técnicas convencionales. Es por ello que sería necesario construir las plantas de producción que deberían funcionar con electricidad proporcionada por los recursos energéticos del planeta. No obstante, los métodos de obtención de los materiales, al igual que en la Luna, aún no están

del todo claros. Por lo que sería necesario realizar futuras investigaciones. Además, también habría que tener en cuenta las distintas condiciones específicas que ocurren en el planeta, y estudiar cómo afectan sobre la salud y la tecnología. Algunas de las condiciones adversas que ocurren en Marte son: poca gravedad, bajas temperaturas, bajas presiones, menor radiación solar, mayor radiación cósmica, tormentas de polvo, etc.

Hasta la fecha se han realizado distintas misiones de exploración a Marte. Sondas como la Mars Odyssey, Mars Express o Mars Reconnaissance Orbiter llevan explorando el planeta rojo desde hace varios años. Además, numerosos *rovers* como el Opportunity, el Curiosity o el InSight Lander han conseguido aterrizar con éxito en el planeta para estudiarlo. En los próximos años se prevé enviar nuevas sondas y *rovers* para seguir explorando el cuerpo [70]. Estas misiones son un primer paso para poder colonizar el planeta en un futuro, y explotar sus recursos para mantener allí la presencia de humanos. Diferentes agencias espaciales de todo el mundo ya están planteando la posibilidad de enviar los primeros humanos a Marte, allá por la década de los 30-40, como es el caso del proyecto Mars One. No obstante, para ello se requerirá un gran esfuerzo para desarrollar toda la tecnología necesaria y hacer frente a los desafíos de vivir en el espacio, utilizar los recursos existentes, gestionar los residuos, etc.

## 5.2. Resumen y conclusiones

En la Tabla 5.1 se resume los principales recursos espaciales que se pueden obtener de cada uno de los cuerpos analizados, según su abundancia estimada en “H” (*high*), “M” (*medium*) y “L” (*low*).

Recurso	Luna	Asteroides	Marte	Utilidad
Agua	M	H (asteroides tipo C)	L-M	-Bebida potable -Protección contra la radiación -Cultivo -Agua utilizable -Generación de oxígeno e hidrógeno
Oxígeno	H	H (asteroides tipo S)	H	-Respiración -Oxidante para combustible
Carbono	L	H (asteroides tipo C)	H	-Generación de combustible y energía -Producción de plástico
Recursos energéticos	H	H	H	-Generación de energía
Metales: Al	H	M (asteroides tipo S o tipo M)	H	-Producción de materiales
Metales: Ti	H	L (asteroides tipo S o tipo M)	L-M	-Producción de materiales

**Tabla 5.1** Recursos espaciales de la Luna, los asteroides y Marte



Centrando la atención en los materiales de interés del proyecto, se puede concluir que el aluminio es un material muy común en el sistema solar. Este se puede encontrar en abundancia en la Luna y Marte, y en menores cantidades en algunos asteroides tipo M o S. El titanio también está presente en muchos cuerpos del espacio, aunque en general en cantidades más reducidas. Aun así, en la Luna se encuentra en abundancia, pero en Marte sus concentraciones son más pequeñas. En los asteroides tipo S o M, en cambio, las concentraciones de titanio son bastante más bajas. Por último, el carbono e hidrógeno (elementos necesarios para poder producir plástico) pueden encontrarse en abundancia en los asteroides tipo C. En Marte las cantidades de carbono son muy altas, pero las de hidrógeno aún no están del todo claras. Por otro lado, en la Luna el carbono es escaso, y el hidrógeno se puede encontrar en forma de agua helada.

El aluminio y el titanio tendrían numerosas aplicaciones en el espacio: hábitats protegidos y demás infraestructuras, componentes y piezas para cualquier tipo de tecnología, etc. El plástico también podría utilizarse para fabricar todo tipo de piezas y componentes. No obstante, estos materiales tendrían que tener unas características muy específicas, ya que deberían trabajar en condiciones extremas en el espacio.

En realidad, resulta difícil identificar un solo recurso que tenga suficiente valor como para establecer toda la industria necesaria para obtener beneficios. No obstante, analizando la composición química de cada uno de los cuerpos se ha podido comprobar la gran variedad de recursos de gran valor que puede ofrecer el sistema solar. Y es que, aunque estos recursos no tengan demasiado valor económico como para llevarlos de vuelta a la Tierra, tienen un enorme valor en el espacio. Esto es debido a que llevar los recursos desde la Tierra supone un gran coste económico, por lo que la demanda (y por tanto el valor y los precios) de los materiales y otros recursos en el espacio podría ser distinta que en la Tierra.

A día de hoy, el ser humano ha llegado a un punto en el que necesita el aprovechamiento de los recursos del espacio para poder seguir explorando el sistema solar. Por un lado, establecer una base con presencia humana en la Luna sería posible mediante la ayuda de los recursos del propio satélite. Por esto, los recursos de mayor interés son aquellos que permitirían sustentar la vida en el espacio, principalmente agua y energía. Aunque los materiales también serían de gran utilidad para poder desarrollar toda la infraestructura y tecnología necesaria para seguir explorando. Esto serviría de práctica para poder colonizar otros planetas en un futuro, como es el caso de Marte. Así pues, la minería espacial sería indispensable para poder establecer una base con presencia humana en cualquier parte del sistema solar. Por el momento, estos recursos serían utilizados para desarrollar tecnología y sustentar la vida en el espacio, de manera que se podría llevar a cabo cualquier tipo de actividad espacial (exploración espacial, prospección de recursos, estudios científicos, turismo espacial, etc). Y, con el tiempo, podría establecerse toda la infraestructura necesaria para poder llevar de vuelta a la Tierra todos aquellos recursos explotados.

Por otro lado, los asteroides despiertan un gran interés, ya que estos se encuentran por todo el sistema solar y pueden proporcionar recursos de gran valor para el ser humano. Cada asteroide puede ser seleccionado para poder obtener unos recursos específicos, por lo que también se estudia la posibilidad de explotar estos cuerpos para producir combustible y poder llegar a sitios inaccesibles actualmente para el hombre, incluso poder volver de Marte (uno de los mayores inconvenientes de la colonización del planeta).

Uno de los principales inconvenientes de la minería espacial es el coste económico. Para que la explotación y uso en el espacio de un recurso espacial sea viable económicamente, se debe cumplir que su coste sea inferior que el coste de llevar el recurso desde la Tierra. En caso de llevar de vuelta los recursos a la Tierra, la explotación sería viable económicamente si los beneficios obtenidos de ellos son superiores al coste de explotación. Sin embargo, hay que tener en cuenta muchísimos factores para poder estudiar la viabilidad económica de la explotación.

Otro de los factores que juegan un papel fundamental es la condición legal del espacio, es decir, de quién es el espacio y los recursos que se encuentran en él. En la actualidad, el marco legislativo referente a este tema no está del todo claro, y tan solo Estados Unidos y Luxemburgo han decidido empezar a regular esta industria [54].

Aun así, la minería espacial ha pasado en poco tiempo de ser pura ciencia ficción a una realidad. Actualmente el ser humano se encuentra entre la etapa de identificación y de exploración de los recursos espaciales. Sin embargo, aunque ya se han llevado a cabo distintas misiones de exploración en cuerpos del sistema solar, es necesario realizar más exploraciones e investigaciones para conocer más sobre estos cuerpos y buscar la manera de explotar sus recursos para poder utilizarlos en el espacio o llevarlos de vuelta a la Tierra. Con todo esto, habría que tener en cuenta las condiciones adversas que se generan en el espacio a la hora de desarrollar todos los métodos, los procesos y la tecnología necesaria, además de estudiar las consecuencias que tiene para el ser humano vivir allí.

Por tanto, y a modo de conclusión, es necesario realizar futuras investigaciones en muchos ámbitos distintos para poder explotar los recursos que ofrece el espacio. Es por ello que, este último capítulo podría ser simplemente la introducción de un futuro proyecto para investigar más sobre la minería espacial.

## CONCLUSIONES

En un inicio, la idea principal del proyecto era estudiar la viabilidad de explotar recursos en cuerpos situados en el espacio. No obstante, ante la gran cantidad de recursos naturales necesarios hoy en día, se decidió examinar los materiales más utilizados en la industria aeroespacial, y centrar todos los esfuerzos en sus recursos. Por este motivo, el aluminio, el titanio y los materiales compuestos orgánicos (plástico) han sido los estudiados a lo largo de todo el proyecto. Posteriormente se buscaron los motivos para sustentar la idea de minar el espacio. De manera que, se decidió estudiar cada una de las fases de explotación de los recursos en la Tierra, para entender cómo y de donde se obtienen los materiales de interés. Así mismo, se analizó el impacto generado durante las diferentes etapas de explotación, así como la disponibilidad de dichos materiales y sus recursos en el planeta.

Por una parte, los resultados obtenidos en el estudio del impacto generado demuestran que la explotación de los recursos contribuye en gran medida a algunos de los mayores problemas a los que se enfrenta la sociedad de hoy en día: cambio climático, contaminación, deforestación, degradación del suelo, gran consumo de materia prima, extinción de flora y fauna, generación de residuos, etc. Además, el estudio demuestra la gran problemática social que conlleva la extracción, sobre todo en países menos desarrollados.

Por otra parte, en el estudio de la disponibilidad de los materiales, se ha demostrado que el ser humano ha sometido al planeta a una tremenda sobreproducción durante los últimos 100 años, explotando los recursos de manera incontrolada. Esto ha provocado, además de los serios problemas medioambientales y sociales, que los picos de producción de los materiales se sitúen a lo largo del siglo XXI. Una vez alcanzado ese pico, podrían empezar a aparecer los primeros problemas relacionados con su disponibilidad. A pesar de esto, resultaría bastante difícil llegar al punto de escasez completa de un recurso.

Ante la problemática ambiental y social, los problemas de escasez y el gran avance e interés en el campo de la exploración espacial, se percibió la necesidad de empezar a investigar sobre la explotación de los recursos en el espacio como una posible solución. Así pues, el primer paso fue buscar la composición de los cuerpos del sistema solar con mayor potencial para explotar. Estos son los más próximos a la Tierra y con mayor interés y accesibilidad para explorar, como la Luna, los NEAs y el planeta Marte. Posteriormente se investigó acerca de la posibilidad de explotar dichos cuerpos.

Las conclusiones obtenidas demuestran que el aluminio es un metal muy abundante en el espacio, y que el titanio también se puede encontrar, aunque en cantidades más reducidas. Y es que la mayoría de los cuerpos del sistema solar están compuestos por los mismos elementos. Además, el plástico podría producirse en cuerpos ricos en carbono e hidrógeno. Se ha comprobado que estos materiales existen y pueden encontrarse fuera del planeta Tierra. Sin embargo, en algunos casos su abundancia no está del todo clara, y aún no se

pueden estimar los recursos y reservas existentes. Por lo que se sugiere seguir explorando estos cuerpos.

Durante esta investigación se ha comprendido que la industria minera espacial tiene que implementarse de manera gradual. En un principio, la explotación de recursos solo sería posible bajo el concepto ISRU. Este concepto es realmente necesario para poder seguir explorando el cosmos y considerar la posibilidad de vivir algún día en el espacio. Actualmente estas ideas tienen un gran interés dentro del mundo de la ciencia y la tecnología espacial. Así pues, para poder vivir en el espacio sería necesario abastecerse de los recursos espaciales, principalmente de aquellos que permitan sustentar la vida. No obstante, es necesario realizar futuras investigaciones sobre la posibilidad de vivir en el espacio.

Además de esto, el concepto ISRU permitiría reducir la dependencia de los recursos terrestres, que son limitados. En consecuencia, parte de la producción en la Tierra podría disminuir, así como el impacto que se genera.

Lentamente, la industria minera y toda la tecnología necesaria podría desarrollarse hasta llegar al punto de establecerse toda una infraestructura para poder transportar los recursos del espacio de vuelta a la Tierra. De esta manera sería posible minimizar en gran medida los problemas derivados de la explotación en el planeta.

Centrando la atención en las fases de explotación de los recursos espaciales, en las etapas de extracción podría utilizarse maquinaria ya existente en la Tierra, como *rovers* o robots automatizados. No obstante, los métodos y procesos necesarios para obtener los materiales aún no están del todo claros, y es que esta tecnología necesita ser desarrollada y demostrada científicamente. Por tanto, es necesario estudiar más a fondo el modo de explotación de los recursos del espacio.

Hay dos asuntos clave que son básicos para poder establecer una futura industria minera, que son el económico y el legal. Resulta imprescindible llevar a cabo estudios económicos con el fin de conocer la viabilidad de dicha actividad, además de desarrollar toda una normativa legal referente al tema.

Para concluir, sería necesario realizar un estudio más profundo para determinar si es viable o no explotar los recursos espaciales. Además, resulta complejo identificar tan solo tres recursos (como los estudiados en este proyecto) con el valor suficiente para establecer toda una industria minera en el espacio. Es decir, las explotaciones mineras serían viables en caso de poder obtener un conjunto de recursos necesarios. Sin embargo, sí se ha comprendido hacia donde hay que investigar para poder conseguir en un futuro abastecerse de los recursos que ofrece el espacio. Por otra parte, el desarrollo de este proyecto se ha visto limitado en función de la complejidad y de la extensión de cada uno de los temas tratados, así como de la limitada información disponible en algunos aspectos. Tal y como se ha mencionado previamente, el presente trabajo podría servir como referencia para seguir profundizando en cada uno de los diferentes temas expuestos.

## Bibliografía

- [1] P. L. Jakab, "Wood to Metal: The Structural Origins of the Modern Airplane," *JOURNAL OF AIRCRAFT*, vol. 36, no. 6, Noviembre-Diciembre 1999.
- [2] Gizmo, «Materiales aeronáuticos,» [En línea]. Available: <http://www.sandglasspatrol.com/IIGM-12oclockhigh/Materiales%20Aeronauticos.htm>. [Último acceso: 12 Febrero 2019].
- [3] G. Sjöberg, «Aircraft Engine Structure Materials,» Suecia, 2008.
- [4] Hispaviación, «La industria aeronáutica y los materiales compuestos. La tecnología carbón "forgé",» [En línea]. Available: <http://www.hispaviacion.es/la-industria-aeronautica-y-los-materiales-compuestos-la-tecnologia-carbon-forge/>. [Último acceso: 12 Febrero 2019].
- [5] Aerospace Manufacturing and Design, «Aerospace materials - past, present, and future,» [En línea]. Available: <https://www.aerospacemanufacturinganddesign.com/article/amd0814-materials-aerospace-manufacturing/>. [Último acceso: 12 Febrero 2019].
- [6] Yashpal, C. Jawalkar y S. Kant, «A review on use of aluminium alloys in aircraft components,» *i-manager's Journal on Material Science*, vol. 3, nº 3, pp. 33-38, 2015.
- [7] J. Davis, «Aluminum and Aluminum Alloys,» de *Alloying: understanding the basics*, Materials Park, Ohio, ASM International, 2001, pp. 351-416.
- [8] V. A. R. Henriques, «Titanium production for aerospace applications,» *Journal of Aerospace Technology and Management*, vol. 1, nº 1, 2009.
- [9] Matthew J. Donachie, Jr, Titanium: a technical guide, Materials Park, OH: ASM International, 2000.
- [10] A. A. Luna, «El titanio y sus aleaciones,» Academia, [En línea]. Available: <https://www.academia.edu/10184660>. [Último acceso: 6 Marzo 2019].
- [11] F. Stupenengo, «Materiales compuestos,» *Materiales y materias primas*, nº 10, 2011.
- [12] E. Menendez, «La industria del aluminio y sus refractarios,» vol. 19, nº 6, pp. 395-400.
- [13] A. M. Donoghue, N. Frisch y D. Olney, «Bauxite Mining and Alumina Refining: Process Description and Occupational Health Risks,» vol. 56, nº 5S, Mayo 2014.
- [14] U.S. Geological Survey, «National Minerals Information Center,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.usgs.gov/centers/nmic/commodity-statistics-and-information>. [Último acceso: 5 Abril 2019].
- [15] World Aluminium, «Sustainable Bauxite Mining Guidelines,» Marzo 2018.
- [16] J. C. Batista, «Estrategia de desarrollo de clusters basados en recursos naturales: el caso de la bauxita en el norte de Brasil,» *Desarrollo productivo*, Julio 2001.
- [17] W. Menzie, J. Barry, D. Bleiwas, E. Bray, T. Goonan y G. Matos, «The Global Flow of Aluminum From 2006 Through 2025,» *U.S. Geological Survey Open-File Report 2010-1256*, 2010.

- [18] F. Millán Delgado, D. P. Sánchez García y J. J. Olaya Flórez, «Reciclaje de aluminio: oportunidades de desarrollo en Bogotá (Colombia),» *Gestión y Ambiente*, vol. 18, nº 2, pp. 135-152, 2015.
- [19] European Aluminium, «Recycling Aluminium: A pathway to a sustainable economy,» Septiembre 2015.
- [20] L. G. Woodruff, G. M. Bedinger y N. M. Piatak, «Titanium,» *Critical Mineral Resources of the United States - Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply*, pp. T1-T23, 2017.
- [21] G. Jones, «Mineral Sands: An Overview of the Industry».
- [22] P. Esteban, L. Bolzoni, E. Ruiz-Navas y E. Gordo, «Introducción al procesamiento pulvimetalúrgico del titanio,» *Revista de Metalurgia*, vol. 2, nº 47, pp. 169-187, Marzo-Abril 2011.
- [23] Y. Hamanaka, Y. Taninouchi y T. H. Okabe, «Developments of novel recycling process for scraps of titanium metal,» *The 6th International Workshop on Industrial Technology of Rare Metals*.
- [24] T. G. Goonan, «Titanium Recycling in the United States in 2004,» *Flow studies for recycling metal commodities in the United States*, 2010.
- [25] Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, «Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea. Producción de Polímeros,» *Serie Prevención y Control Integrados de la Contaminación (IPPC)*, 2009.
- [26] AOP (Asociación Española de Operadores de Productos Petrolíferos), «El petróleo: Fichas didácticas,» 2002.
- [27] PlasticsEurope, «World and EU plastics production data,» *Plastic - the facts*, 2006-2018.
- [28] BP, «Statistical Review of World Energy,» Junio 2018. [En línea]. Available: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>. [Último acceso: 15 Mayo 2019].
- [29] D. P. Ortega Gudiño, «Introducción a la ciencia de los polímeros,» ECUCEI, [En línea]. Available: <https://ecucei.com/polimeros/>. [Último acceso: 18 Abril 2019].
- [30] Ecoticias, «Reciclado de Plásticos ¿Cómo se Reciclan?,» 4 Enero 2010. [En línea]. Available: <https://www.ecoticias.com/residuos-reciclaje/21178/Reciclado-de-Plasticos-Como-se-Reciclan>. [Último acceso: 27 Mayo 2019].
- [31] F. A. López, «Reciclado de materiales compuestos de matriz polimérica».
- [32] G. K. C. DING, «Life Cycle Assessment (LCA) of sustainable building materials: an overview,» *Eco-efficient construction and building materials. Life Cycle Assessment, eco-labelling and case studies*, pp. 38-62, 2014.
- [33] M. d. M. Escribano Bombín y C. Mataix González, «La minería y el medio ambiente: el recorrido de los minerales,» 2007.
- [34] Miner (Ministerio de Industria y Energía), Fundación Entorno, Empresa y Medio Ambiente, «Guías tecnológicas: Metalurgia del aluminio,» *Directiva 96/61 relativa a la prevención y control integrados de la contaminación*, nº Epígrafe 2.5.
- [35] Itlaw, «Titanium Alloys: Energy demand,» 27 Marzo 2016. [En línea]. Available: <https://itlaw.wordpress.com/>. [Último acceso: 5 Mayo 2019].

- [36] T. Norgate, S. Jahanshahi y W. Rankin, «Assessing the environmental impact of metal production processes,» 2006.
- [37] W. E. Harrison y S. M. Testa, «Petroleum and the Environment,» *Agri Environmental Awareness Series*, nº 6, 2003.
- [38] Ecology Center, «PTF: Environmental Impacts,» [En línea]. Available: <https://ecologycenter.org/plastics/ptf/report3/>. [Último acceso: 8 Junio 2019].
- [39] P. Nuss y M. J. Eckelman, «Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis,» vol. 9, nº 7, 2014.
- [40] D. Franks, «Evaluación del impacto social de los proyectos de recursos,» 2012.
- [41] PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, «History Database of the Global Environment,» 31 Agosto 2010. [En línea]. Available: <https://themasites.pbl.nl/tridion/en/themasites/hyde>. [Último acceso: 4 Julio 2019].
- [42] A. Valero Delgado, «Mineral resource depletion assessment,» de *Eco-efficient construction and building materials. Life Cycle Assessment, eco-labelling and case studies*, L. C. F. Pacheco-Torgal, Ed., Zaragoza (España), Woodhead Publishing, 2014, pp. 13-37.
- [43] G. Calvo, A. Valero y A. Valero, «Assessing maximum production peak and resource availability of non-fuel mineral resources: Analyzing the influence of extractable global resources,» *Resources, Conservation & Recycling*, nº 125, pp. 208-217, 2017.
- [44] Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BRG), «Energy resources world-wide,» *BRG Energy Study: Data and Developments Concerning German and Global Energy Supplies*, nº 21, 2017.
- [45] N. T. Arndt, L. Fontboté, J. W. Hedenquist, S. E. Kesler, J. F. Thompson y D. G. Wood, «Future Global Mineral Resources,» *Geochemical Perspectives*, vol. 6, nº 1, 2017.
- [46] G. B. Sanders, W. E. Larson y K. R. Sacksteder, «NASA Lunar Mining & Construction Activities and Plans,» 2009.
- [47] NASA Science: Solar System exploration, «Earth's Moon: Our natural satellite,» Junio 2019. [En línea]. Available: <https://solarsystem.nasa.gov/moons/earths-moon/in-depth/>. [Último acceso: 14 Junio 2019].
- [48] Wikipedia, «Geology of the Moon,» [En línea]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Geology\\_of\\_the\\_Moon](https://en.wikipedia.org/wiki/Geology_of_the_Moon). [Último acceso: 14 Junio 2019].
- [49] G. Jeffrey Taylor, L. M. Martel y B. G. Bays, Jr, «Exploring the Moon: A Teacher's Guide with Activities,» 1997.
- [50] G. H. Heiken, D. T. Vaniman y B. M. French, de *Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon*, 1991.
- [51] P. D. Spudis, N. Zellner, J. Delano, D. Whittet y B. Fessler, «Petrologic mapping of the moon: a new approach,» *Lunar and Planetary Science XXXIII (2002)*, 2002.
- [52] I. A. Crawford, «Lunar Resources: A Review,» *Progress in Physical Geography*.

- [53] NASA, «Ames Technology Capabilities and Facilities,» 29 Marzo 2008. [En línea]. Available: [https://www.nasa.gov/centers/ames/research/technology-onepaggers/in-situ\\_resource\\_Utiliza14.html](https://www.nasa.gov/centers/ames/research/technology-onepaggers/in-situ_resource_Utiliza14.html). [Último acceso: 2 Julio 2019].
- [54] S. W. Anderson, K. Christensen y J. LaManna, «The development of natural resources in outer space,» *Journal of Energy & Natural Resources Law*, 2018.
- [55] NASA, «Explore Moon to Mars,» [En línea]. Available: <https://www.nasa.gov/specials/moon2mars/>. [Último acceso: 18 Junio 2019].
- [56] Mining, «Mining the moon ready to lift off by 2025,» 1 Marzo 2019. [En línea]. Available: <https://www.mining.com/mining-moon-ready-lift-off-2025>. [Último acceso: 18 Junio 2019].
- [57] NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL): Center for Near Earth Object Studies, «Discovery Statistics,» 2 Junio 2019. [En línea]. Available: <https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/totals.html>. [Último acceso: 1 Julio 2019].
- [58] Outer Places, «SpaceX's Falcon Heavy Could Mine Thousands of Distant Asteroids,» 19 Febrero 2018. [En línea]. Available: <https://www.outerplaces.com/science/item/17835-spacex-falcon-heavy-mine-distant-asteroids>. [Último acceso: 1 Julio 2019].
- [59] Universe Today, «What Are Asteroids Made Of?,» 12 Septiembre 2015. [En línea]. Available: <https://www.universetoday.com/37425/what-are-asteroids-made-of/>. [Último acceso: 20 Junio 2019].
- [60] Asterank, [En línea]. Available: <http://www.asterank.com>. [Último acceso: 20 Junio 2019].
- [61] K. Zacny, P. Chu, J. Craft, M. M. Cohen, W. W. James y B. Hilscher, «Asteroid Mining,» *AIAA SPACE 2013 Conference and Exposition*, 2013.
- [62] Naukas, «La odisea de Hayabusa 2 para recoger muestras del asteroide Ryugu,» 24 Febrero 2019. [En línea]. Available: <https://danielmarin.naukas.com/2019/02/24/la-odisea-de-hayabusa-2-para-recoger-muestras-del-asteroide-ryugu/>. [Último acceso: 20 Junio 2019].
- [63] Xataka, «La carrera por ser el primero en la minería de asteroides: así se está planteando la "fiebre del oro" espacial,» 10 Septiembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.xataka.com/espacio/carrera-ser-primero-mineria-asteroides-asi-se-esta-planteando-fiebre-oro-espacial>. [Último acceso: 20 Junio 2019].
- [64] NASA Science: Mars Exploration Program, «The Red Planet,» [En línea]. Available: <https://mars.nasa.gov>. [Último acceso: 26 Junio 2019].
- [65] J. Brückner, G. Dreibus, R. Gellert, S. W. Squyres, H. Wänke, A. Yen y J. Zipfel, «Mars Exploration Rovers: chemical composition by the APXS,» *The Martian Surface: Composition, Mineralogy, and Physical Properties*, pp. 58-101, 2008.
- [66] P. R. Christensen, J. L. Bandfield, A. D. Rogers, T. D. Glotch, V. E. Hamilton, S. Ruff y M. B. Wyatt, «Global mineralogy mapped from the Mars Global Surveyor Thermal Emission Spectrometer,» *The Martian Surface: Composition, Mineralogy, and Physical Properties*, pp. 195-220, 2008.
- [67] B. L. Ehlmann y C. S. Edwards, «Mineralogy of the Martian Surface,» *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, pp. 291-315, 2014.



- [68] Explore Mars, «Mars Global Data Sets,» [En línea]. Available: <http://www.mars.asu.edu/data>. [Último acceso: 25 Junio 2019].
- [69] R. W. Moses y D. M. Bushnell, «Frontier In-Situ Resource Utilization for Enabling Sustained Human Presence on Mars,» 2016.
- [70] Digital Trends, «Todas las misiones a Marte pasadas, presentes y futuras,» 3 Marzo 2019. [En línea]. Available: <https://es.digitaltrends.com/tendencias/misiones-planeta-marte>. [Último acceso: 27 Junio 2019].
- [71] Ingemecánica, «Propiedades Mecánico-Químicas,» [En línea]. Available: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn110.html>. [Último acceso: 17 Febrero 2019].
- [72] P. Rambabu, N. Eswara Prasad, V. Kutumbarao y R. Wanhill, «Aluminium Alloys for Aerospace Applications,» de *Aerospace Materials and Material Technologies*, Singapore, 2017, pp. 29-52.
- [73] M. Danylenko, «Aluminium Alloys in the Aerospace Industry,» *Supplement: Aerospace*, 2018.
- [74] J. Staley y D. Lege, «Advances in aluminium alloy products for structural applications in transportation,» *Journal de Physique IV Colloque*, vol. 3, pp. C7-179-C7-190, 1993.
- [75] Interempresas, «Materiales metálicos de uso frecuente en aeronáutica: aleaciones ligeras Al-Li,» 11 Noviembre 2012. [En línea]. Available: <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/101138-Materiales-metalicos-de-uso-frecuente-en-aeronautica-aleaciones-ligeras-Al-Li.html>. [Último acceso: 25 Febrero 2019].
- [76] NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL), «Street Math, Space Shuttle Style,» [En línea]. Available: <https://www.jpl.nasa.gov/edu/teach/activity/street-math-space-shuttle-style/>. [Último acceso: 25 Febrero 2019].
- [77] B. D. Dunn, «Requirements for Spacecraft Materials,» de *Materials and Processes for Spacecraft and High Reliability Applications*, Springer, 2016, pp. 7-53.
- [78] I. Inagaki, Y. Shirai, T. Takechi y N. Ariyasu, «Application and Features of Titanium for the Aerospace Industry,» *Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report*, nº 106, 2014.
- [79] R. Boyer, «An overview on the use of titanium in the aerospace industry,» *Materials Science and Engineering*, pp. 103-114, 1996.
- [80] J. D. Cotton, R. D. Briggs, R. R. Boyer, S. Tamirisakandala, P. Russo, N. Shchetnikov y J. C. Fanning, «State of the Art in Beta Titanium Alloys for Airframe Applications,» *The Minerals, Metals & Materials Society*, vol. 67, nº 6, pp. 1281-1303, 2015.
- [81] Ingemecánica, «Estudio de los materiales compuestos,» [En línea]. Available: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn114.html>. [Último acceso: 15 Marzo 2019].
- [82] A. Moral Borque y M. Nogueira López, «Materiales de última generación y materiales eficientes: materiales compuestos - composites,» Junio 2007.
- [83] J. I. Rojas, «Materiales Compuestos,» *Apuntes de la asignatura de Ciencia y Tecnología de los Materiales del grado de Ingeniería de Sistemas Aeroespaciales (UPC-EETAC)*, 2017.

- [84] Plataforma Aeroespacial Española, «Armonización de las Actividades en Materiales Compuestos para Aeronáutica y Espacio en España,» 2010.
- [85] F. Tanasa y M. Zanoaga, «Fiber-Reinforced Polymer Composites as structural materials for aeronautics,» *International Conference of Scientific Paper*, 2013.



Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i  
Aeroespacial de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# ANEXOS

**TÍTULO DEL TFG:** Estudio sobre la viabilidad de explotaciones mineras en cuerpos extraterrestres

**TITULACIÓN:** Grado en Ingeniería de Sistemas Aeroespaciales, mención en Aeronavegación

**AUTOR:** Francesc Torrens Garcia

**DIRECTOR:** Pere Bruna Escuer

**DATA:** 15 de julio del 2019

## ANEXOS<sup>2</sup>

### Anexo A. Glosario

#### Variables de evaluación del impacto medioambiental

**GER (*Gross Energy Requirement*)**: Cantidad acumulada de energía consumida en todas las fases de producción de un metal, desde la extracción del recurso hasta la obtención del material.

**GWP (*Global Warming Potential*)**: Contribución sobre el impacto del calentamiento global generado por la emisión de diferentes gases. Se expresa en kg CO<sub>2</sub>-eq por cada kg de material producido.

**AP (*Acidification Potential*)**: Contribución sobre el impacto de la lluvia ácida generada por la emisión de diferentes gases. Se expresa en kg SO<sub>2</sub>-eq por cada kg de material producido.

**SWB (*Solid Waste Burden*)**: Cantidad de residuos generados desde la extracción de un recurso hasta la obtención del material.

#### Clasificación de los recursos naturales

**Recursos**: Concentración natural de elementos en forma sólida, líquida o gaseosa que se encuentran en la corteza terrestre y que, por su forma y cantidad, son o pueden ser extraídos económicamente. Estos engloban los recursos identificados y los que aún no se han descubierto, por lo que este término abarca la disponibilidad total del recurso.

**Recursos identificados**: Recursos cuya localización, grado, calidad y cantidad es conocida o estimada a partir de sus evidencias geológicas. Estos recursos incluyen los económicos, marginalmente económicos y sub económicos. Para poder reflejar los diferentes niveles de certidumbre geológica, esta clasificación se puede sub dividir en medidos, indicados e inferidos. Los recursos demostrados son la suma de los medidos e indicados.

- Medidos: Elementos cuya existencia, cantidad, características (dimensiones, forma, contenido, etc.) y leyes del mineral han sido demostradas cuantitativamente.
- Indicados: Elementos cuya existencia, cantidad, características y leyes del mineral han sido estimadas. Su grado de certidumbre es menor que los medidos, pero suficiente.
- Inferidos: Elementos cuya existencia ha sido demostrada pero sus dimensiones y demás características se desconocen con exactitud.

---

<sup>2</sup> Las referencias de los anexos se encuentran en la bibliografía del proyecto.

**Reservas base:** Recursos identificados que cumplen con las especificaciones físicas y químicas mínimas para llevar a cabo procesos de extracción y producción. Pueden ser económicos, marginalmente económicos o sub económicos.

**Reserva:** Parte de una reserva base susceptible de ser extraída y producida económicamente en un momento determinado.

**Reserva marginal:** Parte de una reserva base, cuya extracción y producción estaría limitada económicamente, es decir, que existe una incertidumbre económica.

**Recursos sub económicos:** Parte de los recursos identificados que no cumplen con los criterios económicos requeridos para su explotación.

**Recursos económicos:** Recursos cuya extracción y producción es rentable económicamente.

**Recursos no identificados:** Recursos cuya existencia solo ha sido postulada, teniendo en cuenta que sus depósitos pueden tener diferentes grados y localizaciones físicas. De manera que puedan ser considerados económicos, marginalmente económicos o sub económicos. Estos pueden clasificarse a su vez en hipotéticos y especulativos en función del grado de ocurrencia más o menos cierta de los recursos.

#### Unidades de la curva de producción de Hubbert

**Exergía (B):** Trabajo útil que puede extraerse de un sistema a medida que se va equilibrando juntamente con el entorno. En otras palabras, es el mínimo trabajo necesario para llevar a un sistema a su estado inicial. Este término se refiere, en general, a una medida de la calidad de las cosas. Situando este término en contexto, la exergía de un depósito sería la energía mínima necesaria para recuperar y restaurar su composición y concentración inicial desde un estado disperso. Este término considera una eficiencia tecnológica máxima.

**Coste de reemplazamiento de exergía (B\*):** Este término se refiere al concepto de exergía, pero teniendo en cuenta la eficiencia de la tecnología actual. En contexto, este término se refiere a la energía mínima necesaria para recuperar y restaurar la composición y concentración inicial de un depósito mediante la tecnología actual disponible.

## Anexo B. Aluminio: Características, aleaciones y aplicaciones

### Características

Las características generales del aluminio sin alear son las siguientes (Tabla B.1) [71]:

Símbolo	Al
Clasificación	Metal no férreo
Número atómico	13
Valencia	3
Configuración electrónica	$3s^2 3p^1$
Electronegatividad (Pauling)	1,5
Estado de oxidación	+3
Estructura cristalina	FCC ( <i>Face Centered Cubic</i> )
Masa atómica (g/mol)	26,98

**Tabla B.1** Características principales del Al

Las principales propiedades se describen en la Tabla B.2 [71].

Propiedad	Valor
Densidad ( $\text{g/cm}^3$ )	2,70
Temperatura de fusión ( $^{\circ}\text{C}$ )	660
Temperatura de ebullición ( $^{\circ}\text{C}$ )	2467
Calor específico ( $\text{J/g}\cdot\text{K}$ )	0,92
Calor latente de fusión ( $\text{J/kg}$ )	$395 \cdot 10^3$
Calor latente de ebullición ( $\text{J/kg}$ )	$9220 \cdot 10^3$
Conductividad térmica ( $\text{W/m}\cdot\text{K}$ )	230
Conductividad eléctrica ( $\text{S/m}$ )	$37,8 \cdot 10^6$
Coeficiente de dilatación lineal ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	$2,4 \cdot 10^{-5}$

**Tabla B.2** Propiedades del Al

### Aleaciones

Las aleaciones del Al se pueden dividir en función del tipo de proceso de conformado: la forja (que puede ser tratable térmicamente o no) y la fundición.

Muchas de las aleaciones responden térmicamente con tratamientos como el tratamiento térmico de solución, el enfriamiento, la precipitación o el endurecimiento entre otros [7].

Dentro de las aleaciones de aluminio forjado sin tratamiento térmico, en las cuales solo se puede trabajar en frío para optimizar sus propiedades, se encuentran:

- Aleaciones 1XXX: Pertenecen al aluminio puro, que contienen un 99% o más de Al seguido de impurezas como hierro o silicio. Se caracterizan por sus bajas propiedades mecánicas, su alta conductividad térmica y eléctrica y por su excelente resistencia a corroerse. Además, son muy maleables.
- Aleaciones 3XXX: Aumentan en un 20% la resistencia del aluminio puro.
- Aleaciones 5XXX: Su principal elemento es el magnesio, aunque también se le pueden añadir pequeñas cantidades de manganeso. Endurecen el aluminio y mejoran la resistencia a la corrosión.

En cuanto a las tratadas térmicamente:

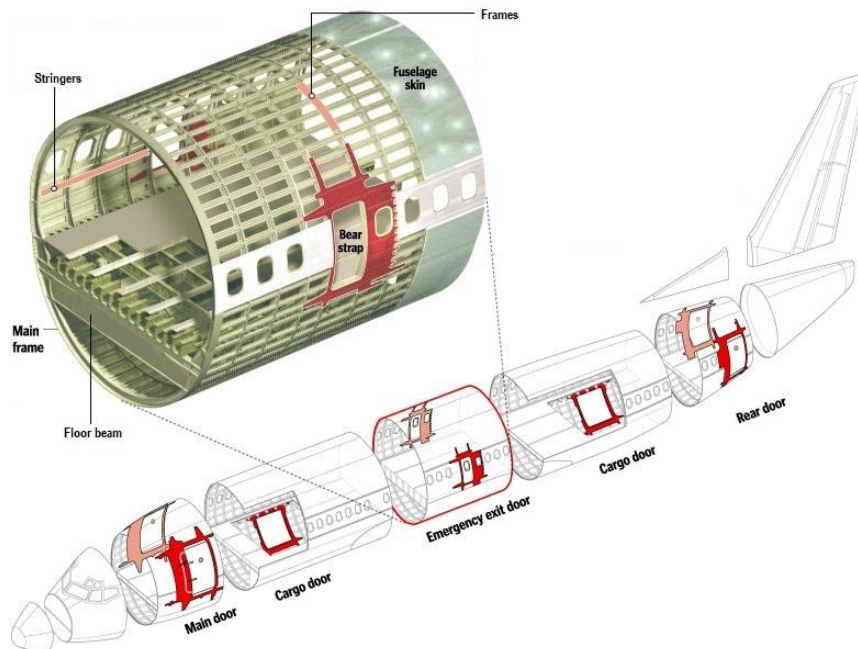
- Aleaciones 2XXX: El principal elemento es el cobre, aunque también se le puede añadir magnesio. Mediante el tratamiento térmico se mejoran las propiedades mecánicas, aunque se reduce la resistencia a la corrosión. Las aleaciones que se obtienen en forma de lámina se pueden recubrir de aleaciones 6XXX para solucionar este problema.
- Aleaciones 6XXX: No se mejora demasiado la resistencia, aunque aumenta la maleabilidad, soldabilidad, conformabilidad y la resistencia a la corrosión.
- Aleaciones 7XXX: Aumentan en gran medida la resistencia del aluminio. Las aleaciones más resistentes pueden presentar problemas de agrietamiento por corrosión.

Otras aleaciones:

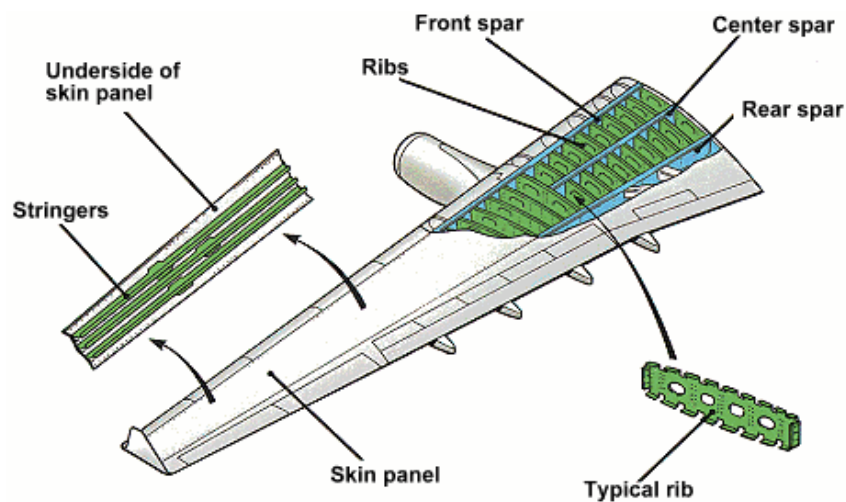
- Aleaciones 4XXX: Reducen la temperatura de fusión del material. La mayoría no se pueden tratar con calor, aunque cuando se utilizan para soldar aleaciones tratadas térmicamente pueden responder al tratamiento.
- Aleaciones aluminio-litio (8XXX o 2XXX): Estas aleaciones se presentan como el futuro de las aleaciones de aluminio, aunque se empezaron a utilizar en los años 50 en aviación. Su ligereza (debido a la baja densidad del Li), rigidez, alto módulo elástico, resistencia a altas y bajas temperaturas, resistencia a la fatiga, resistencia a la corrosión y buena soldabilidad ha hecho que vuelva el interés por utilizar estas aleaciones ya que suponen una buena reducción de costes. Sus desventajas son la baja tenacidad y la sensibilidad de las propiedades a la composición y comportamiento de la microestructura. Algunas de estas aleaciones contienen ciertas cantidades de magnesio para mejorar la resistencia mecánica y cinc para mejorar la resistencia a la corrosión.

## Aplicaciones

En las siguientes imágenes (Figura B.1 y Figura B.2) se observa la estructura interna del fuselaje y de las alas de una aeronave, en la cual se utilizan aleaciones como las de aluminio.



**Figura B.1** Estructura de un fuselaje semimonocasco



**Figura B.2** Estructura interna de un ala

En la Tabla B.3 se observan las principales aplicaciones de las aleaciones del aluminio [6] [72] [73] [74] [75] [76] [77].



Aleación	Aplicación
2014	Estructura interna y tren de aterrizaje
2024	Recubrimiento del fuselaje <i>Stringers</i> y parte inferior de las alas (intradós) Estructura de cohetes y vehículos espaciales
2219	Tanque de combustible externo (SWT y LWT) y estructura principal de cohetes
7050	<i>Stringers</i> y <i>frames</i> del fuselaje <i>Stringers</i> y costillas de las alas Parte superior de las alas (extradós) Tren de aterrizaje Soportes de las alas y del fuselaje
7068	Tren de aterrizaje <i>Stringers</i> y <i>frames</i> del fuselaje <i>Stringers</i> de las alas <i>Floor beam</i> Raíles de los asientos
7075	Tren de aterrizaje <i>Stringers</i> y <i>frames</i> del fuselaje <i>Stringers</i> y <i>spars</i> de las alas Estabilizador vertical y horizontal <i>Floor beam</i> Raíles de los asientos Estructura y partes de motores de cohetes espaciales
7055 y 7150	Extradós de las alas y <i>spars</i> <i>Stringers</i> del fuselaje Soportes de las alas y del tren de aterrizaje
7175	<i>Stringers</i> en las alas y el fuselaje
7020	Estructura principal de cohetes
5052	Componentes de motores
6061	Partes del fuselaje y de las alas
6063	Componentes detallados
2195	SLWT y demás tanques externos de lanzaderas espaciales
2090	Recubrimiento de las alas y su borde de ataque Suelo y asientos Alerones, elevadores, timones, mamparos, bastidores, <i>flaps</i> , <i>slats</i> y <i>spoilers</i> <i>Nacelle</i>
2091	Recubrimiento del fuselaje <i>Stringers</i> del ala Puertas y asientos <i>Flaps</i> y mamparos
2050	Parte inferior del ala
8090	Recubrimiento del fuselaje Puertas <i>Stringers</i> , costillas y mamparos Asientos y carriles de carga

Tabla B.3 Aplicaciones del Al

## Anexo C. Titanio: Características, aleaciones y aplicaciones

### Características

Las características generales del titanio sin alear son las siguientes (Tabla C.1) [10]:

Símbolo	Ti
Clasificación	Metal de transición
Número atómico	22
Valencia	2, 3, 4
Configuración electrónica	$3d^2 4s^2$
Electronegatividad (Pauling)	1,5
Estado de oxidación	+4
Estructura cristalina	HCP (tipo alfa) BCC (tipo beta)
Masa atómica (g/mol)	47,90

**Tabla C.1** Características principales del Ti

Las propiedades físicas se describen en la Tabla C.2 [9]:

Propiedad	Valor
Densidad ( $\text{g/cm}^3$ )	4,51
Temperatura de fusión ( $^{\circ}\text{C}$ )	1668
Temperatura de ebullición ( $^{\circ}\text{C}$ )	3260
Calor específico a $25^{\circ}\text{C}$ ( $\text{J/g}\cdot\text{K}$ )	522,3
Calor latente de fusión ( $\text{J/kg}$ )	$440 \cdot 10^3$
Calor latente de ebullición ( $\text{J/kg}$ )	$9,83 \cdot 10^6$
Conductividad térmica ( $\text{W/m}\cdot\text{K}$ )	11,4
Conductividad eléctrica (relativa al cobre)	0,03
Coeficiente de dilatación lineal ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	$8,41 \cdot 10^{-6}$

**Tabla C.2** Propiedades del Ti

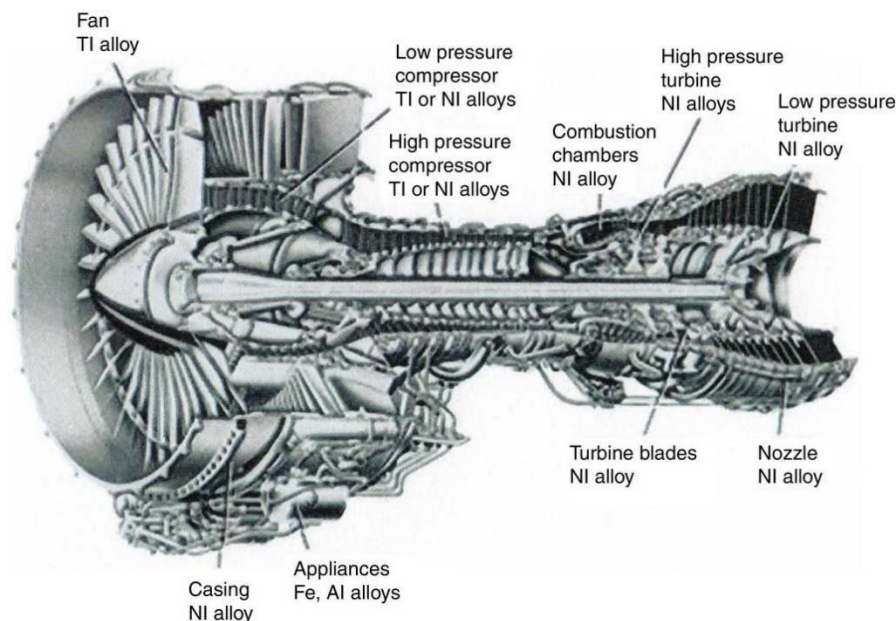
### Aleaciones

A continuación, se detallan cada uno de los tipos de aleación [9]:

- Las aleaciones de tipo  $\alpha$  y casi  $\alpha$  son moderadamente fuertes, duras, dúctiles y tienen capacidad para soldarse, aunque son poco forjables. Presentan buena resistencia a la corrosión ya que normalmente tienen grandes cantidades de aluminio que contribuyen a esta mejora. Son adecuadas en aplicaciones donde se requiere trabajar a altas temperaturas o en aplicaciones criogénicas. A diferencia de las aleaciones de tipo  $\beta$ , no se pueden mejorar sus propiedades mecánicas mediante tratamientos térmicos.
- Las aleaciones tipo  $\beta$  son muy fuertes, duras, moderadamente dúctiles, forjables y moldeables gracias a su microestructura. Tienen la capacidad de endurecerse mediante tratamientos térmicos como el tratamiento por solución entre otros.
- Las aleaciones tipo  $\alpha/\beta$  son las más resistentes. Además, son dúctiles y moldeables, y sus propiedades pueden ser optimizadas mediante tratamientos térmicos. Tienen poca capacidad para soldarse.

### Aplicaciones

Las principales aplicaciones del titanio son los motores de aeronaves. En la Figura C.1 se muestra las partes de un motor turbofan, así como los materiales de los que está hecho.



**Figura C.1** Materiales de un motor *turbofan*

Las aplicaciones del titanio en el sector aeroespacial se describen en la Tabla C.3, Tabla C.4 y Tabla C.5 [78] [79] [80]:

Aleación	Aplicación
Titanio comercialmente puro	Estructura: soportes estructurales del suelo Componentes: soportes, tubos de los anti hielo y del ECS ( <i>Environmental Control System</i> )
Ti-3Al-2,5V (Ti-3-2,5)	Componentes: tubos hidráulicos de presión
Ti-5Al-2,5Sn (Ti-5-2,5)	Aplicaciones criogénicas: HPFTP ( <i>High-Pressure Fuel Turbopump</i> )
Ti-8Al-1Mo-1V (Ti-8-1-1)	Motores: álabes de los compresores
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo (Ti-6-2-4-2S)	Estructura: soportes de los motores Motores: álabes, discos y rotores, compresor de alta presión
Ti-5,5Al-3,5Sn-3Zr-1Nb-0,25Mo-0,3Si	Motores: discos del compresor, álabes y separadores
Ti-5,8Al-4Sn-3,5Zr-0,7Nb-0,5Mo-0,35Si-0,06C	Motores: discos del compresor

**Tabla C.3** Aplicaciones de las aleaciones alfa y casi alfa del Ti

Aleación	Aplicación
Ti-13V-11Cr-3Al (Ti-13-11-3)	Componentes: muelles
Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al (Ti-15-3)	Estructura: soportes estructurales del suelo, área de carga Motores: <i>nacelle</i> Componentes: tubos y conductos del ECS, muelles y frenos de aviones militares APU: soportes anti vibración
Ti-10V-2Fe-3Al (Ti-10-2-3)	Estructura: pistas de los <i>flaps</i> , cola del avión, puertas de carga, fuselaje y alas Motor: <i>nacelle</i> Tren de aterrizaje Componentes: frenos de aviones militares Helicópteros: rotores y ejes
Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr (Beta-C)	Componentes: muelles del tren de aterrizaje, del <i>yoke</i> , de los pedales de freno y de los controles de vuelo
Ti-15Mo-3Nb-3Al-0,2Si (Beta-21S)	Motores: estructura interna y recubrimiento del <i>thrust reverser</i> y <i>exhaust nozzle</i> APU
Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe (BT-22)	Estructura: <i>flaps</i> , <i>slats</i> y demás componentes del fuselaje Tren de aterrizaje
Ti-35V-15Cr (Alloy C)	Motores: <i>exhaust nozzle</i> y componentes del compresor de aviones militares

**Tabla C.4** Aplicaciones de las aleaciones beta del Ti

Aleación	Aplicación
Ti-6Al-4V (Ti-6-4)	Elementos estructurales: tornillos, raíles de los asientos, estructura del suelo, cola del avión, parabrisas, alas y fuselaje APU: conducto de escape Tren de aterrizaje Motores: <i>nacelle</i> , álabes del <i>fan</i> , discos y álabes del compresor de baja presión
Ti-6Al-6V-2Sn (Ti-6-6-2)	Tren de aterrizaje
Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo (Ti-6-2-4-6)	Motores militares
Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Cr-4Mo (Ti-17)	Motores: discos del <i>fan</i> y del compresor de alta presión

**Tabla C.5** Aplicaciones de las aleaciones alfa/beta del Ti

## **Anexo D. Materiales compuestos: Clasificación, características y aplicaciones**

### Clasificación y características

Los *composites* pueden clasificarse según su tipo de matriz en [81]:

- Metálicos - MMC (Metal Matrix Composites): proporcionan resistencia, rigidez y tenacidad al material, teniendo la capacidad de soportar altas temperaturas. A pesar de esto, son densas y son más difíciles de procesar. Destacan las matrices de aluminio, magnesio, cobre y níquel.
- Cerámicos - CMC (Ceramic Matrix Composites): presentan una gran resistencia mecánica y se comportan muy bien a altas temperaturas, pero son poco tenaces, y su conductividad eléctrica y térmica es muy baja.
- Orgánicos o poliméricos - RP (Reinforced Plastics): son poco resistentes y pueden presentar problemas en diferentes condiciones meteorológicas, pero son muy ligeras y tenaces. Estas se pueden dividir en termoplásticos, termoestables (o duro plásticos) y elastómeros. Los materiales compuestos orgánicos más utilizados son los CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics), los GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastics), los AFRP (Aramid Fiber Reinforced Plastic) y los RCC (Reinforced Carbon-Carbon).

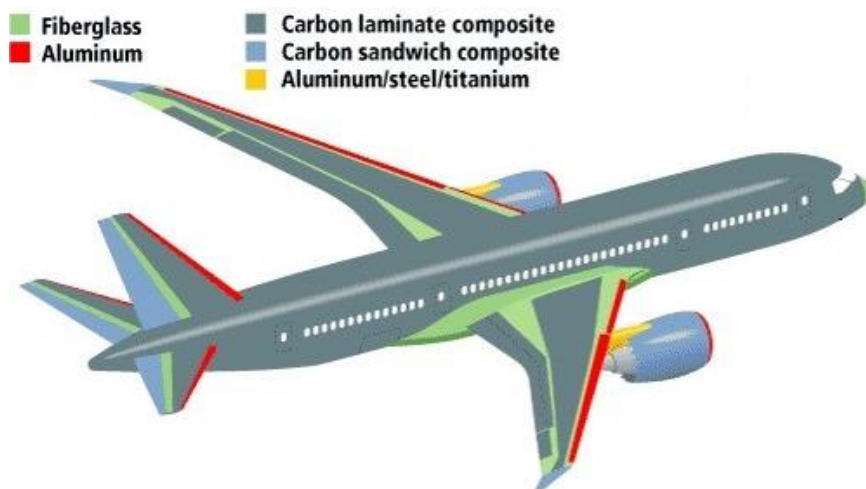
Los *composites* también se pueden clasificar según el refuerzo:

- Materiales compuestos reforzados con fibras [81]: Las propiedades de las fibras varían en función del tipo de fibra y de cómo estén orientadas, aunque en general consiguen mejorar la relación resistencia-ligereza, la resistencia a la fatiga y la rigidez del material incluso a temperaturas elevadas. Existen numerosos tipos de fibra que pueden ser continuas (largas) y discontinuas (cortas). Las fibras de vidrio presentan una gran resistencia a tracción, son duras, flexibles y resistentes al ataque de agentes químicos. Las de carbono son muy rígidas y resistentes gracias a la estructura hexagonal de los átomos de carbono en el grafito, pero su resistencia frente a impactos es relativamente baja. Las fibras cerámicas tienen un buen comportamiento a altas temperaturas. Las fibras orgánicas son las obtenidas a partir de polímeros, y entre las más usadas cabe destacar el Kevlar por su rigidez, resistencia a los impactos, buen comportamiento a altas temperaturas y baja densidad; y las fibras de aramida por su alta resistencia a la corrosión y a los impactos. Aunque actualmente se están utilizando cada vez más las fibras provenientes de productos naturales, ya que estas son más económicas y su impacto medioambiental es mucho menor. Por ello se dedican más esfuerzos a la investigación de materiales compuestos totalmente ecológicos.

- Materiales compuestos reforzados con partículas [82]: Se pueden clasificar en materiales compuestos reforzados con partículas grandes y consolidados por dispersión. La principal ventaja frente a las fibras es que las partículas suelen tener las mismas dimensiones en todas las direcciones. Las propiedades mejoran según la cantidad de partículas introducidas (volumen relativo de ambas fases), y el refuerzo es mayor cuanto más pequeñas sean las partículas y cuanto mejor distribuidas estén dentro de la matriz. Por un lado, las partículas grandes que se introducen suelen tener más resistencia y dureza que la matriz, y su función consiste en restringir el movimiento de cada partícula, por lo que la mejora de las propiedades depende en gran medida de la interfase entre la matriz y las partículas. Por otro lado, las de dispersión son más pequeñas y dificultan el desplazamiento de dislocaciones, de manera que se mejora la resistencia mecánica, la dureza y el límite elástico (aunque es la propia matriz la que soporta la mayoría de esfuerzos).
- Materiales compuestos estructurales [83]: Son materiales compuestos en los cuales sus propiedades no dependen solo de los materiales constituyentes, sino de la geometría del diseño. Se destacan los laminados y los paneles *sandwich*. Por una parte, los laminados están formados por diferentes paneles apilados en direcciones determinadas (unidireccionales, bidireccionales o entrecruzados aleatoriamente). Se consiguen materiales con altas propiedades mecánicas. Por otra parte, los paneles *sandwich* constan de dos paneles delgados muy resistentes separados por un medio estabilizante o núcleo de baja densidad (como espumas o núcleos de panal de abeja). Con ello se puede obtener un material muy resistente, rígido, ligero y delgado.

### Aplicaciones

En la Figura D.1 se muestran las partes de un avión Boeing 787 hechas a partir de materiales compuestos.



**Figura D.1** Materiales compuestos utilizados en un avión

Los composites más utilizados en el sector aeroespacial se describen en la Tabla D.1 y Tabla D.2 [77] [83] [84] [85].

<i>Composite</i>	<i>Aplicación</i>
CFRP	Elementos estructurales: alerones, elevadores, <i>flaps</i> , <i>spoilers</i> , puertas del tren de aterrizaje, estructuras del suelo, cono de cola, estabilizador vertical y horizontal, cajón de torsión central, <i>winglets</i> Satélites: estructuras, reflectores de antenas y paneles solares Cohetes: estructura, <i>exhaust cone</i> del motor Estructuras de aviones militares Motores: <i>nacelle</i>
GFRP	Elementos estructurales: borde de ataque delantero y trasero, radomo, cajón de torsión central Vehículos y cápsulas espaciales: recubrimiento de la estructura
AFRP	Elementos estructurales: radomo, <i>belly fairing</i> , partes de los soportes de los motores Motores: <i>nacelle</i>
CMCs	Motores: álabes de la turbina de baja presión, cámara de combustión Tren de aterrizaje Vehículos espaciales: morro, <i>flaps</i> TPS (Thermal Protection System) y estructura de vehículos aeroespaciales
MMCs	TPS y estructura de vehículos aeroespaciales Cohetes: tanques criogénicos y toberas del motor
RCC	TPS de vehículos aeroespaciales: partes de la estructura como el morro o el borde de ataque de las alas
RP	Helicópteros: Palas de rotores, paneles de fuselaje, cabezas de rotor

**Tabla D.1** Aplicaciones de los materiales compuestos según la matriz



<i>Composite</i>	Aplicación
GLARE (Glass Reinforced)	Elementos estructurales: partes del fuselaje
Materiales compuestos con estructuras <i>sandwich</i> de carbono	Elementos estructurales: timón de dirección, elevadores, <i>winglets</i> Motores: <i>nacelle</i> Estructuras de helicópteros
Materiales compuestos con láminas de carbono	Elementos estructurales: <i>flaps</i> , alerones, recubrimiento del fuselaje y de las alas, cono de cola, estabilizador vertical y horizontal
Fibra de vidrio	Elementos estructurales: radomo, cajón de torsión central
Fibras de carbono	Vehículos y cápsulas espaciales: recubrimiento de la estructura

**Tabla D.2** Aplicaciones de los materiales compuestos según el refuerzo

## Anexo E. Datos de producción

En la Tabla E.1 se representan los datos de producción de los materiales y sus recursos en millones de toneladas por año.

Año	Elemento						
	Aluminio	Bauxita	Titanio esponja	Rutilo	Ilmenita	Plástico	Petróleo*
1900	0,0068	0,088					22,488(20)
1901	0,0068	0,106					24,012
1902	0,0079	0,136					25,639
1903	0,0085	0,189					27,377
1904	0,01	0,133					29,232
1905	0,013	0,159					31,213
1906	0,017	0,201					33,328
1907	0,022	0,269					35,587
1908	0,017	0,243					37,999
1909	0,03	0,275					40,574
1910	0,045	0,356					43,324(44)
1911	0,046	0,425					46,259
1912	0,058	0,435					49,394
1913	0,065	0,539					52,742
1914	0,069	0,236					56,316
1915	0,078	0,321					60,132
1916	0,106	0,701					64,207
1917	0,123	1,03					68,559
1918	0,128	0,818					73,205
1919	0,121	0,569					78,166
1920	0,125	0,901					83,463(99)
1921	0,07	0,318					89,119
1922	0,087	0,701					95,158
1923	0,141	1,2					101,607
1924	0,168	1,16					108,493
1925	0,178	1,38			0,0148		115,845
1926	0,195	1,38		0,0000771	0,0213		123,696
1927	0,22	1,88		0,0000454	0,036		132,078
1928	0,258	2,03		0,000059	0,04		141,029
1929	0,28	2,15		0,0000426	0,0481		150,586
1930	0,272	1,63		0,0000463	0,0435		160,8(195)
1931	0,22	1,15		0,0000209	0,0436		171,687
1932	0,153	1		0,0000653	0,0656		183,322
1933	0,142	1,1		0,000152	0,0788		195,745
1934	0,17	1,33		0,000352	0,106		209,011

1935	0,259	1,77		0,000411	0,173		223,175
1936	0,36	2,83		0,00102	0,225		238,299
1937	0,482	3,75		0,00211	0,282		254,448
1938	0,579	3,87		0,000967	0,322		271,691
1939	0,72	4,34		0,00137	0,233		290,103
1940	0,787	4,39		0,00625	0,355		309,7(293)
1941	1,04	6,11		0,0129	0,235		330,754
1942	1,4	8,36		0,0173	0,2		353,169
1943	1,95	14		0,0202	0,359		377,102
1944	1,69	6,96		0,0218	0,461		402,657
1945	0,87	3,43		0,0187	0,513		429,944
1946	0,79	4,36		0,0167	0,51		459,081
1947	1,08	6,32		0,0221	0,682		490,191
1948	1,27	8,36		0,0227	0,713		523,410
1949	1,31	8,23		0,0253	0,819		558,881
1950	1,49	8,18		0,0249	0,856	1,5	596,7(519)
1951	1,8	10,9		0,0425	0,0979		637,195
1952	2,06	12,8		0,0456	0,857		680,376
1953	2,47	13,8		0,045	0,675		726,484
1954	2,81	16,2		0,0523	1		775,716
1955	3,14	17,8		0,0687	1,12		828,284
1956	3,37	18,8		0,111	1,43		884,415
1957	3,37	20,5		0,142	1,54		944,350
1958	3,51	21,4		0,0936	1,41		1008,346
1959	4,06	23,1		0,0965	1,51		1076,679
1960	4,49	27,6		0,104	1,65		1149(1050)
1961	4,7	29,4		0,117	1,69		1227,551
1962	5,06	31,1		0,136	1,69		1310,739
1963	5,32	30,7		0,201	1,64		1399,565
1964	5,94	33,4		0,195	1,86		1494,410
1965	6,31	37,4		0,222	1,96		1567,9
1966	6,88	40,7		0,25	2,14		1702,3
1967	7,57	44,6		0,282	2,19		1826,6
1968	8,02	46		0,302	2,309		1992,7
1969	8,97	51,8		0,396	2,53		2144,8
1970	9,65	57,8		0,417	2,83		2358,8
1971	10,3	62,1		0,384	2,58		2493,9
1972	11	64,9		0,319	2,45		2635,8
1973	12,1	70,4		0,35	2,71		2874,9
1974	13,2	79,6		0,361	3,19		2881,7
1975	12,1	74,8		0,382	2,9		2736,5
1976	12,6	77,4		0,404	3,17		2972,6
1977	13,8	81,9		0,345	3,32	50	3076,4
1978	14,1	81		0,302	3,51		3106,9
1979	14,6	85,5		0,354	3,55		3237,0

1980	15,4	89,2		0,436	3,73		3091,3
1981	15,1	85,3		0,362	3,65		2913,8
1982	13,4	79,3		0,339	3,03		2798,9
1983	13,9	78,7		0,31	2,67		2762,9
1984	15,7	87,2		0,341	3,83		2816,8
1985	15,4	84,2		0,376	3,46		2794,4
1986	15,4	88,2		0,394	3,42		2932,6
1987	16,5	91,6		0,439	3,94		2946,0
1988	18,5	97,4		0,434	4,12		3065,8
1989	19	103		0,454	4,35	100	3098,7
1990	19,3	113		0,456	4,07		3157,0
1991	19,7	111		0,46	3,36		3148,1
1992	19,5	105		0,491	3,92		3195,2
1993	19,8	110		0,501	3,99		3194,1
1994	19,2	106	0,033	0,545	3,97		3240,1
1995	19,7	112	0,035	0,416	4,01		3285,6
1996	20,8	117	0,0525	0,366	4,01		3374,6
1997	21,7	122	0,058	0,425	4,07		3461,3
1998	22,6	123	0,052	0,438	4,56		3537,8
1999	23,6	129	0,05	0,37	4,1		3467,6
2000	24,3	136	0,051	0,39	4,3		3616,2
2001	24,3	137	0,055	0,41	4,6		3611,4
2002	26,1	144	0,072	0,39	4,4	200	3591,1
2003	28	153	0,065	0,38	4,9		3739,9
2004	29,9	164	0,078	0,34	4,6	225	3906,6
2005	31,9	178	0,088	0,351	4,8		3936,1
2006	33,9	193	0,11	0,415	5,4	245	3963,6
2007	37,9	221	0,138	0,564	5,72	257	3954,2
2008	39,7	224	0,166	0,59	5,8	245	3999,0
2009	37,2	209	0,11	0,55	5,3	250	3892,6
2010	41,8	239	0,132	0,67	5,8	265	3981,4
2011	46,8	254	0,186	0,73	6,1	279	4009,5
2012	49,2	254	0,19	0,73	6,5	288	4120,8
2013	51,9	291	0,222	0,667	6,73	299	4125,3
2014	54	264	0,192	0,47	5,57	311	4223,0
2015	57,5	293	0,171	0,76	6,19	322	4355,2
2016	58,9	275	0,17	0,8	5,5	335	4377,1
2017	59,4	309	0,17	0,77	5,54	348	4387,1
2018	60	300	0,18	0,75	5,4		
<b>Total</b>	1.389,934	7.655,299	-	25,8157886	246,3546	-	194.896,5

\*Los datos desde 1900 hasta 1964 han sido interpolados. Entre paréntesis, los datos reales.

**Tabla E.1** Datos de producción de los materiales y de los recursos naturales